

การระบุตำแหน่งรอยแตกบนครอบฟันเซรามิกโคเนียมอนอลิติกโดยการ
ทดสอบด้วยคลื่นอะคูสติกและอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึก

CRACK LOCALIZATION IN MONOLITHIC ZIRCONIA CROWN USING
ACOUSTIC EMISSION-BASED AND A DEEP LEARNING ALGORITHM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-D-318-295

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CRACK LOCALIZATION IN MONOLITHIC ZIRCONIA CROWN USING
ACOUSTIC EMISSION-BASED AND A DEEP LEARNING ALGORITHM



KUSON TUNTIWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN BIOMEDICAL
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-20XX-EN-D-318-295

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การระบุตำแหน่งรอยแตกบนครอบฟันเซอรโคเนียชนิดโมโนลิติกโดยการทดสอบด้วยคลื่นอะคูสติกและอัลกอริธึมการเรียนรู้เชิงลึก
นักศึกษา	นางสาว กุศล ตันตวงส์
รหัสประจำตัว	64601020
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมชีวการแพทย์
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางใหม่ที่ใช้การแปลงสัญญาณอย่างต่อเนื่องและการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อการจดจำรูปแบบและการจำแนกประเภทของสัญญาณการแตกร้าบบนครอบฟันเซอรโคเนียชนิดโมโนลิติก ซึ่งครอบฟันชนิดดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในทางคลินิก ในการหาวิธีการตรวจสอบที่มีความแม่นยำและสามารถตรวจทราบถึงความเสียหายได้ตั้งแต่แรกนั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการรักษาผู้ป่วยทันตกรรมในปัจจุบัน การวิจัยนี้ใช้ระบบรับข้อมูลการตรวจจับในลักษณะที่ไม่ทำลาย (Nondestructive testing, NDT) โดยใช้เซ็นเซอร์วัดสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission Sensor, AE Sensor) เพื่อตรวจสอบตำแหน่งรอยแตกร้าบบนครอบฟัน จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อต้องการพัฒนาการตรวจสอบตำแหน่งความเสียหายคือการแตกร้าที่เกิดขึ้นกับวัสดุครอบฟันเซอรโคเนียชนิดโมโนลิติกด้วยการวัดคลื่นอะคูสติกร่วมกับอัลกอริธึมการเรียนรู้เชิงลึกชนิดอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง (Inception-ResNet-V2) ซึ่งมีขั้นตอนหลักดังนี้ ทำการเก็บสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน ที่เกิดจากการหักของไส้ดินสอ (Pencil lead breaking, PLB) ที่บริเวณด้านตัดของฟัน ด้านริมฝีปาก ด้านเพดานปาก ด้านซ้ายและด้านขวาของครอบฟัน ตำแหน่งละ 500 สัญญาณและทำการแปลงสัญญาณที่เซ็นเซอร์ตรวจจับไว้เป็นข้อมูล csv และทำการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบเบย์เซียน (Bayesian) ต่อจากนั้น ข้อมูลที่ถูกการคัดกรองเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาประมวลผลและจำแนกประเภทคุณลักษณะสัญญาณโดยใช้แบบจำลองอัลกอริทึมที่เรียกว่าอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง ซึ่งช่วยในการแปลผลรอยแตกของครอบฟันอย่างแม่นยำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถตรวจจับรอยร้าบบนพื้นผิวครอบฟันได้อย่างแม่นยำโดยมีค่าความถูกต้องรวมถึง 99.4% การบูรณาการทดสอบคลื่นอะคูสติกกับอัลกอริธึมการเรียนรู้เชิงลึกแบบอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง ทำให้การศึกษานี้แตกต่างออกไป โดยนำเสนอโซลูชันอัตโนมัติและมีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจจับการแตกร้าบบนครอบฟันทางคลินิกได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น เพื่อนำไปใช้ในการรักษาผู้ป่วยที่มีประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	CRACK LOCALIZATION IN MONOLITHIC ZIRCONIA CROWN USING ACOUSTIC EMISSION-BASED AND A DEEP LEARNING ALGORITHM
Student	Miss. Kuson Tuntiwong
Student ID.	64601020
Degree	Doctor of Engineering
Program	Biomedical Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Supan Tungjitkusolmun

ABSTRACT

This research focuses on developing a deep learning method combined with acoustic emission (AE) sensors to detect and classify fracture signals in monolithic zirconia crowns, a common dental restoration. In modern dental care, accurately detecting early signs of damage in crowns is critical to preventing future issues. This study employs nondestructive testing (NDT) to collect sensor data and analyze it for potential cracks. The primary objective is to create a deep learning-based approach that uses AE signals to pinpoint crack locations on dental crowns. These signals were generated by simulating crack events using pencil lead breaks (PLB) at specific points on the crown, including the incisal edge, anterior, palatal, left, and right areas. For each location, 500 AE signals were recorded, converted into CSV format, and filtered using a Bayesian method to remove noise. The filtered data was then analyzed using the Inception-ResNet-V2 deep learning algorithm, which classified signal features to accurately identify the location of cracks. The results showed that this method achieved a total accuracy of 99.4% in detecting cracks on the crown surface. The study stands out for integrating AE testing with deep learning, offering an efficient and automated approach for early detection of defects in dental crowns. This method could be valuable for improving future clinical practices in dental crown monitoring and prevention.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความสะดวกจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุพันธ์ุ ตั้งจิตกุศลมั่น
ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะ ให้ความรู้และรับฟัง ช่วยแก้ไขปัญหาอุปสรรคนานัปการรวมถึงให้ความคิดเห็น
ที่ดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบพระคุณ กรรมการผู้สอบวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำทำให้การปรับปรุงแก้ไข
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทพญ.กาญจนา กาญจนทวีวัฒน์ ผู้ซึ่งเปรียบเสมือนอาจารย์แม่ที่ให้คำ
ปรึกษาและคอยแนะนำในการออกแบบการทดสอบที่เสมือนจริงในช่องปากของผู้ป่วยรวมถึงท่านยัง
อนุเคราะห์สถานที่รวมทั้งตัวอย่างโมเดลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุกกิจ ที่ให้ความรู้ ชี้แนะและช่วยบริหารจัดการในการ
ทำงานวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านพ้นไปด้วยดี และศุภณีย์ เบิร์นแล็บ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง และขอขอบคุณเพื่อนๆที่ๆนั่งๆในห้องปฏิบัติการทุกคน

ขอขอบพระคุณ คณะทันตแพทยศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง และขอขอบคุณเพื่อนๆที่ๆนั่งๆคณาจารย์ในคณะทุกคน

คุณความดีอันเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับประเทศไทยซึ่งเป็นแผ่นดินเกิด
และเติบโตอยู่อาศัย ขอมอบให้กับบิดามารดา ปู่ย่าตายาย ซึ่งเป็นผู้ที่อุ้มชู ชี้แนะอบรมสั่งสอนข้าพเจ้า
ตลอดไปถึงครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และสอนสั่งให้ข้าพเจ้าจนถึงทุกวันนี้

กุศล ตันตวิงส์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา (OBJECTIVE OF THE RESEARCH).....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา (SCOPE OF THE RESEARCH).....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา (PROCESS OF THE RESEARCH).....	2
1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น (ASSUMPTION OF THE RESEARCH).....	3
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา (LIMITATION OF THE RESEARCH).....	3
1.7 สรุปงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 โครงสร้างของฟัน.....	4
2.1.1 โครงสร้างเคลือบฟัน.....	5
2.1.2 โครงสร้างเนื้อฟัน.....	8
2.2 การแบ่งด้านของฟันตามชื่อเรียกทางทันตกรรม.....	12
2.3 เซรามิกและโครงสร้างเซรามิก.....	12
2.3.1 ประเภทของครอบฟันและการพัฒนาครอบฟันที่ใช้ในคลินิกทันตกรรม.....	13
2.3.2 การร้าวของเซรามิก (Cracked in dental ceramic material).....	22
2.4 วิธีการตรวจการแตกร้าวของวัสดุ การตรวจแบบไม่ทำลาย.....	30
2.5 การทดสอบด้วยการปล่อยคลื่นอะคูสติก.....	35
2.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบดั้งเดิม.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY).....	44
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย.....	44
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการและการเก็บรวบรวม.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้าง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบอัลกอริทึม อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง	47
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล (ANALYSIS OF DATA)	52
4.1 การปรับเทียบการปล่อยเสียงของสัญญาณ(AE sensor Amplitude Calibration)	52
4.1.1 การจำลองการแตกร้าบริเวณด้านริมฝีปากของครอบฟัน	52
4.1.2 การจำลองการแตกร้าบริเวณด้านเพดานของครอบฟัน	53
4.1.3 การจำลองการแตกร้าบริเวณด้านปลายตัดฟันของครอบฟัน	53
4.1.4 การจำลองการแตกร้าบริเวณด้านซ้ายของครอบฟัน	54
4.1.5 การจำลองการแตกร้าบริเวณด้านขวาของครอบฟัน	55
4.1.6 ภาพรวมการจำลองการแตกร้าแต่ละตำแหน่งบนครอบฟัน	55
4.2 การกำจัดเสียงรบกวน (Denoised Preprocessing)	56
4.3 การแปลงข้อมูลเป็นเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง	58
4.4 ผลของการฝึกฝนผ่านอัลกอริทึมอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง	61
บทที่ 5 การวิจารณ์หรืออภิปรายผล (DISCUSSIONS)	64
5.1 หลักเกณฑ์ในการเลือกเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	64
5.2 หลักเกณฑ์ในการพิจารณาการเลือกวิธีการกำจัดเสียงรบกวน	65
5.3 การเลือกการแปลงสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง	69
5.3.1 ความแตกต่างระหว่างภาพสคาโลแกรมและภาพสเปกโตรแกรม	69
5.4 การเลือกใช้อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง	69
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ (CONCLUSION)	71
บรรณานุกรม	72
ประวัติผู้เขียน	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทำการฝึกและการทดสอบ (training/testing) ข้อมูลภาพสคาโลแกรม (Scalogram) ทั้ง 5 ชุดข้อมูล.....	50
ตารางที่ 2 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านริมฝีปาก (Labial) หน่วย dB	52
ตารางที่ 3 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านเพดาน (Palatal) หน่วย dB53	
ตารางที่ 4 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านปลายฟันตัด (Incisal) หน่วย dB.....	53
ตารางที่ 5 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านประชิดโกลกลาง (Left) หน่วย dB.....	54
ตารางที่ 6 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านประชิดโกลกลาง (Right) หน่วย dB.....	55
ตารางที่ 7 แสดงถึงส่วนของพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการทำการกำจัดเสียงรบกวน.....	56
ตารางที่ 8 แสดงถึงลักษณะของภาพสคาโลแกรม ที่ผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียน (Bayesian denoised).....	59
ตารางที่ 9 แสดงถึงการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆในอัลกอริธึมอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง	61
ตารางที่ 10 แสดงตัวชี้วัดการตรวจจับที่ได้จากการประเมินสถาปัตยกรรมการจำแนกรูปภาพและการตรวจจับพื้นผิวรอยร้าวบนชุดทดสอบของชุดข้อมูลสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน-สัญญาณเวฟเลตแบบต่อเนื่องในแต่ละตำแหน่งบนฟัน	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่1 กายวิภาคของฟันกรามล่างมนุษย์	4
รูปที่2 ส่วนแนวยาวของฟันหน้า	10
รูปที่3 การเรียกชื่อด้านแต่ละด้านของฟันทางทันตกรรม	12
รูปที่4 เฟสทรานพอร์เมชันของ เซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO ₂)	17
รูปที่5 แผนผังโครงสร้างและการจำแนกประเภทของเซอร์โคเนียทางทันตกรรมที่มีอิตเทรียสแทปีไลซ์ เซอร์โคเนีย (yttria-stabilized dental zirconia)	19
รูปที่6 การทดสอบทางคลินิก รายงานลักษณะความเสียหายสำหรับเซรามิกหลายระบบ	24
รูปที่7 แผนผังแสดงการแตกหักในโหมดต่างๆทั้งในส่วนของตัวฟันและโครงสร้างเซรามิก	25
รูปที่8 ความแข็งแรงของเซรามิกเซอร์โคเนีย	27
รูปที่9 ความสึกของรอยแตกผ่านส่วนของชั้นเทียบกับจำนวนรอบสำหรับวัสดุโมโนลิธิค(Monolith)	28
รูปที่10 แสดงถึงคุณสมบัติของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์	39
รูปที่11 แผนผังลูกบอลรายงานความถูกต้องอันดับสูงสุด 1 และอันดับสูงสุด 5	41
รูปที่12 อุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์	45
รูปที่13 ภาพแสดงตำแหน่งการหักใส่ดินสอในแต่ละตำแหน่งบนครอบฟัน	46-47
รูปที่14 แสดงภาพรวมขั้นตอนการดำเนินการผ่านโครงร่างสำหรับเครือข่ายอินเซพชั่นเรสเน็ทสอง	47
รูปที่15 โครงสร้างเพิ่มเติมของเครือข่ายอินเซพชั่นเรสเน็ทสอง	48
รูปที่16 โครงสร้างโมดูลอินเซพชั่นเรสเน็ทสอง ขนาดกริด 35x35	48
รูปที่17 โครงสร้างโมดูลลดขนาดจากกริด 35x35 เป็น 17x17	48
รูปที่18 โครงสร้างโมดูลอินเซพชั่นเรสเน็ทบี ขนาดกริด 17x17	49
รูปที่19 โครงสร้างโมดูลรีดักชันบิลด์ขนาดจากกริด 17x17 เป็น 8x8	49
รูปที่20 โครงสร้างโมดูลอินเซพชั่นเรสเน็ทซี ขนาดกริด 8x8	49
รูปที่21 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านริมฝีปากที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)	52
รูปที่22 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านเพดานที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)	53
รูปที่23 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านปลายตัดฟันที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)	54
รูปที่24 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านซ้ายที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)	54
รูปที่25 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านขวาที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)	55
รูปที่26 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของแต่ละคลาส ที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)	55
รูปที่27 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านริมฝีปาก	56

รูปที่28 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านเพดาน 57
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่29 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านปลายฟันตัด.....	57
รูปที่30 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านประชิดไกลกลาง.....	57
รูปที่31 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านประชิดใกล้กลาง.....	58
รูปที่32 แสดงเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) สำหรับชุดข้อมูลทดสอบทั้ง 5คลาส.....	62
รูปที่33 แสดงกราฟอาร์โอซี (ROC curve)และพื้นที่ใต้กราฟอาร์โอซี (AUC) ในแต่ละคลาสภายหลังการผ่านการทดสอบ.....	63
รูปที่34 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการกรองแบบเบย์เซียนและแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านปลายฟันตัด.....	66
รูปที่35 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการกรองแบบเบย์เซียนและแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านริมฝีปาก.....	66
รูปที่36 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการกรองแบบเบย์เซียนและแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านประชิดไกลกลาง.....	67
รูปที่37 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการกรองแบบเบย์เซียนและแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านประชิดใกล้กลาง.....	67
รูปที่38 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการกรองแบบเบย์เซียนและแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านเพดาน.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

MZ	โมนอลิติกเซอร์โคเนีย (Monolithic zirconia)
NDT	การตรวจจับในลักษณะที่ไม่ทำลาย (Nondestructive testing)
AE	สัญญาณอะคูสติกอีมิชชั่น (Acoustic emission)
PLB	การหักของไส้ดินสอ (Pencil lead breaking)
CWT	การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform)
TP	การพยากรณ์ความผิดปกติตรวจพบจริงและเป็นความผิดปกติจริง (True Positive)
TN	การพยากรณ์ความผิดปกติตรวจไม่พบและไม่มีความผิดปกติจริง (True Negative)
FP	การพยากรณ์ความผิดปกติตรวจพบจริงแต่ไม่มีความผิดปกติจริง (False Positive)
FN	การพยากรณ์ความผิดปกติตรวจไม่พบแต่มีความผิดปกติจริง (False Negative)
db	เดซิเบล (decibels)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาในเรื่องการแตกร้าวในวัสดุมีมากมายและยาวนาน ทั้งใช้ในการตรวจโดยวิธีแบบทำลาย (destructive) และแบบไม่ทำลาย (nondestructive) [1] ทั้งในการตรวจอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและอันตราย ตัวอย่างเช่น โครงสร้างเครื่องบิน [2, 3] ยานอวกาศ [4] ถังแก๊ส [5] รางรถไฟ [6] จนกระทั่งไปถึงโครงสร้างสะพานต่างๆ [7] คอนกรีต [8] โครงสร้างของวัสดุต่างๆ [9-11] ซึ่งในปัจจุบันนี้มาตรฐานวิธีการตรวจสอบมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและ ระบบปัญญาประดิษฐ์เข้ามามีบทบาทสำคัญในการช่วยให้เกิดความแม่นยำในการวิเคราะห์ความเสียหายในทางวิทยาศาสตร์สุขภาพ [12] การนำองค์ความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ที่พัฒนาไปถึงระดับสูงมาผนวกกับการนำไปใช้ในการรักษาผู้ป่วยเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่งในปัจจุบัน ทำให้เกิดการบูรณาการการทำงานระหว่างศาสตร์ที่ลงตัวและเข้าใจความต้องการของการใช้งานเพื่อประโยชน์สูงสุดแก่ประชาชน

งานบูรณะทางทันตกรรมมีการใช้วัสดุหลายชนิด ตั้งแต่วัสดุที่เป็นอมัลกัม คอมโพสิต ครอบฟันชนิดต่างๆตั้งแต่ ครอบฟันโลหะ ครอบฟันโลหะเคลือบด้วยผิวเซรามิก ครอบฟันเซรามิก ปัจจุบันครอบฟันเซรามิกมีใช้กันอย่างแพร่หลายด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน [13] การใช้ระบบแคด/แคม (CAD/CAM) เพื่อกลึงวัสดุครอบฟันในการรักษาผู้ป่วยแต่ละคนมีความรวดเร็วและสะดวกขึ้นรวมทั้งมีความแม่นยำมาก [14] ทำให้มีความนิยมและใช้ครอบฟันเซรามิก ที่ให้ทั้งความสวยงามและความคงทน ครอบฟันเซรามิกที่นิยมใช้เป็นชนิดโมโนลิติกในการใช้งานต้องมีการตรวจผู้ป่วยที่มีการใส่ครอบฟันไป เนื่องจากการสบฟันที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โครงสร้างฟันซี่อื่นๆมีการสึกกร่อนไปตามการใช้งาน ทำให้ครอบฟันมีโอกาสเกิดการเสียหายอันเกิดจากการใช้งาน รวมถึงลักษณะนิสัยของผู้ป่วยในการบดเคี้ยวที่ผิด ปกติยิ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ [15-17]

การตรวจวิเคราะห์หาความเสียหายที่เป็นส่วนของโครงสร้างของวัสดุที่อยู่ในช่องปาก ซึ่งในปัจจุบันมีการตรวจพื้นฐาน [18] เช่นการตรวจจากการซักประวัติ การตรวจด้วยตา การตรวจด้วยภาพถ่ายรังสีซึ่งการตรวจเมื่อพบความเสียหายแล้ว ก็จะมีความรุนแรงของความเสียหายไปค่อนข้างมากเกินกว่าที่จะสามารถแก้ไขได้แล้ว และในปัจจุบันยังไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจทางคลินิกเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือตรวจการแตกร้าวของครอบฟันที่ใส่เข้าไปในช่องปากของผู้ป่วยในทางคลินิก จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาและประมวลผลสัญญาณคลื่นอะคูสติกบนครอบฟันซึ่งเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กนั้นมีความจำเป็นอย่างมาก ที่ต้องได้รับความแม่นยำของผลลัพธ์โดยใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึกแบบอินเซพชันเรสเน็ตสอง (Inception-ResNet-V2) [19] เพื่อใช้เป็นข้อมูลสัญญาณพื้นฐานของวัสดุรวมทั้งการใช้ประโยชน์ของการเรียนรู้เชิงลึก [20] มา

ประยุกต์ใช้ในการตรวจหารอยร้าวของครอบฟันดังกล่าวให้กับทันตแพทย์ในคลินิกเป็นระยะ ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถป้องกันแก้ไขได้อย่างทันท่วงทีและเพื่อลดค่าใช้จ่ายให้กับคนไข้รวมทั้งเพิ่มคุณภาพชีวิตที่ดีของประชาชนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา (OBJECTIVE OF THE RESEARCH)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) เพื่อศึกษาการตรวจหาตำแหน่งของการแตกร้าวของวัสดุเซรามิกเคลือบฟันชนิดโมโนลิติกแบบไม่ทำลายโดยการทดสอบสัญญาณอะคูสติกพร้อมกับการใช้การเรียนรู้เชิงลึกแบบ อินเซพชันเรสเน็ตสอง
- 2) เพื่อศึกษาและแยกคุณลักษณะของข้อมูลพื้นฐานลักษณะสัญญาณของคลื่นอะคูสติกกับตำแหน่งการร้าวบนครอบฟันเซรามิกเคลือบฟันชนิดโมโนลิติกโดยการทดสอบการหักใส่ดินสอด่ตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี976 (ASTM E976) [21]

1.3 ขอบเขตของการศึกษา (SCOPE OF THE RESEARCH)

การศึกษานี้ทำการศึกษาโดยใช้คลื่นสัญญาณที่เกิดจากการสร้างสัญญาณการแตกร้าวบนครอบฟันเซรามิกเคลือบฟันชนิดโมโนลิติกด้วยการหักของใส่ดินสอด่ตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี976 [21] ที่ถูกจับด้วยเซ็นเซอร์อะคูสติก สัญญาณที่ได้ถูกนำมากำหนดตำแหน่งของรอยร้าวบนครอบฟันและทำการแปลงสัญญาณเป็นภาพสัญญาณแบบการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) ภาพสคาโลแกรมที่ได้ในแต่ละตำแหน่ง หลังจากนั้นทำการฝึกสอนโมเดลและทำการทดสอบโดยเลือกใช้อัลกอริทึมแบบอินเซพชันเรสเน็ตสอง เพื่อนำไปใช้ในการเป็นข้อมูลนำร่องในการวิเคราะห์ตำแหน่งการแตกร้าวบนครอบฟันเซรามิกเคลือบฟันชนิดโมโนลิติกในทางคลินิกต่อไป

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา (PROCESS OF THE RESEARCH)

การศึกษานี้เป็นการเก็บสัญญาณที่เป็นการสร้างสัญญาณด้วยการหักของใส่ดินสอด่ตามมาตรฐาน เอเอสทีเอ็ม อี976 บนครอบฟันเซรามิกเคลือบฟันชนิดโมโนลิติกและการนำสัญญาณที่ได้มาทำการแปลงเป็นสัญญาณภาพ และนำภาพสัญญาณที่ได้ในแต่ละตำแหน่งทำการจัดกลุ่มของสัญญาณเพื่อใช้เป็นข้อมูลสัญญาณในการฝึกและการทดสอบ โดยเลือกใช้อัลกอริทึมอินเซพชันเรสเน็ตสอง โดยทำการหาค่าความถูกต้องรวมของโมเดลทุกคลาส (Total accuracy) ค่าความถูกต้อง (Recall) ความแม่นยำ (Precision) ระดับเอฟวัน (F1-Score) พื้นที่ใต้กราฟอาร์ไอซี (AUC) เพื่อใช้ในการทราบถึงความเชื่อมั่นในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น (ASSUMPTION OF THE RESEARCH)

ข้อตกลงเบื้องต้น (ASSUMPTION) ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาบนกรอบพินเซอร์โคเนียชนิดโมโนลิทในการเก็บสัญญาณเสียงเออี ในการจำลองการแตกร้าวของวัสดุโดยการหักของไส้ดินสอดำตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี976

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา (LIMITATION OF THE RESEARCH)

1. ตัวเก็บสัญญาณทั้งหมดจะรับคลื่นในย่านความถี่ 60-400 กิโลเฮิร์ตซ์ เท่านั้น
2. การเก็บสัญญาณอยู่ในการทดลองเฉพาะกรอบพินเซอร์โคเนียชนิดโมโนลิทที่เป็นพื้นหน้า โดยเป็นพื้นเดียวไม่ได้มีพื้นหรือวัสดุข้างเคียง
3. การสร้างสัญญาณการแตกร้าวโดยวิธีการหักของไส้ดินสอดำตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี976
4. ตำแหน่งการกำหนดการแตกร้าวถูกแบ่งตามมาตรฐานของการแบ่งด้านของพื้นตามความรู้การเรียกชื่อด้านในวิชาชีพทันตแพทย์ [22]

1.7 สรุปงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้พบว่า ผลของการทดสอบสัญญาณอะคูสติกร่วมกับการใช้การเรียนรู้เชิงลึกแบบอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง สามารถระบุตำแหน่งของการแตกร้าวของวัสดุเซอร์โคเนียชนิดโมโนลิติกแบบไม่ทำลายได้อย่างดีเยี่ยมโดยมีค่าความถูกต้องรวมถึงร้อยละ 99.4
2. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและแยกคุณลักษณะของข้อมูลพื้นฐานลักษณะสัญญาณของคลื่นอะคูสติกร่วมกับตำแหน่งการร้าวบนกรอบพินเซอร์โคเนียชนิดโมโนลิทโดยโดยการทดสอบการหักไส้ดินสอดำตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี976 ในตำแหน่งด้านริมฝีปากมีแอมพลิจูดเฉลี่ยอยู่ที่ 19.22 เดซิเบล ในตำแหน่งด้านเพดานมีแอมพลิจูดเฉลี่ยอยู่ที่ 17.94 เดซิเบล ในตำแหน่งด้านปลายฟันตัดมีแอมพลิจูดเฉลี่ยอยู่ที่ 16.99 เดซิเบล ในตำแหน่งด้านประชิดไกลกลางมีแอมพลิจูดเฉลี่ยอยู่ที่ 22.66 เดซิเบล ในตำแหน่งด้านประชิดใกล้กลางมีแอมพลิจูดเฉลี่ยอยู่ที่ 23.53 เดซิเบล ที่ความถี่ที่แตกต่างกันและมีการแสดงภาพสคาโลแกรมที่มีความแตกต่างกันในแต่ละคลาส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

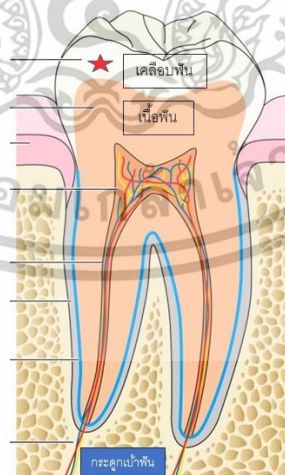
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 โครงสร้างของฟัน

โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้ ขอเน้นเฉพาะโครงสร้างของฟันในส่วนของเคลือบฟันและส่วนของเนื้อฟันเท่านั้น เนื่องจากมีผลต่อที่มีของการพัฒนาคุณสมบัติของครอบฟันที่ใช้งานทางคลินิก

กายวิภาคของฟันของมนุษย์ [23] ลักษณะสำคัญของฟันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะมีลักษณะเหมือนกัน คือ

1. ส่วนของเคลือบฟัน สร้างจากเซลล์เยื่อบุ (epithelial cell)
2. ส่วนของเนื้อฟัน สร้างจากเซลล์ต้นกำเนิดมีเซนไคม์ (mesenchymal cell) และประกอบด้วยคอลลาเจน
3. โพรงประสาทฟัน เป็นอวัยวะที่มีการสร้างและเสริมของเซลล์สร้างเนื้อฟัน (odontoblast) และประกอบด้วยหลอดเลือดและเส้นประสาท
4. รากฟัน ประกอบด้วย เนื้อฟันและคลองรากฟันและล้อมรอบด้วยเนื้อเยื่อเคลือบรากฟัน (cementum)
5. เนื้อเยื่อเอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal ligament) เป็นส่วนหนึ่งของกระดูกเบ้าฟัน (alveolar bone) ซึ่งเชื่อมระหว่างเคลือบรากฟันกับกระดูกเบ้าฟัน



รูปที่1 กายวิภาคของฟันกรามล่างมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 โครงสร้างเคลือบฟัน

ลักษณะทางกายภาพของเคลือบฟัน [24]

เคลือบฟันเป็นเมทริกซ์ส่วนที่แข็งที่สุดของร่างกาย เคลือบฟันของฟันที่ขึ้นเต็มที่ประกอบด้วยแร่ธาตุประมาณร้อยละ 96 และสารอินทรีย์และน้ำอีกร้อยละ 4 ปริมาณสารอินทรีย์ของเคลือบฟันคือผลึกแคลเซียมฟอสเฟตรูปหนึ่ง ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ซึ่งสามารถถูกแทนที่ด้วยคาร์บอนเนตไอออน ซึ่งพบได้ในกระดูก กระดูกอ่อน เนื้อฟัน และเคลือบรากฟัน ไอออนต่างๆ เช่น สตรอนเทียม แมกนีเซียม ตะกั่ว และฟลูออไรด์ ถ้ามีอยู่ในระหว่างการสร้างเคลือบฟัน อาจถูกรวมเข้าไปในผลึกแคลเซียมฟอสเฟต การละลายด้วยกรดต่อผลึกเป็นสาเหตุสำหรับการเกิดฟันผุ

เคลือบฟันมีลักษณะโปร่งแสงและมีสีต่างๆ ตั้งแต่สีเหลืองอ่อนไปจนถึงสีเทา-ขาว นอกจากนี้ยังมีความหนาแตกต่างกันไป ตั้งแต่ความหนาสูงสุดประมาณ 2.5 มิลลิเมตร และมีความบางขนาดขนนกบริเวณคอฟันการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลต่อสีของเคลือบฟันเนื่องจากเนื้อฟันสีเหลืองที่อยู่เบื้องล่างสามารถมองเห็นได้ผ่านบริเวณที่บางกว่า

เซลล์ที่มีหน้าที่ในการก่อตัวของเคลือบฟัน คือ เซลล์อะมีโลบลาสต์ (Ameloblast) จะหายไปเมื่อฟันงอกเข้าไปในช่องปาก และด้วยเหตุนี้เคลือบฟันจึงไม่สามารถสร้างใหม่ได้ เพื่อชดเชยข้อจำกัดโดยธรรมชาตินี้ เคลือบฟันจึงเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนและการมีแร่ธาตุในระดับสูง ในระยะเจริญเติบโตเต็มที่จะมีการขาดหายไปของเมทริกซ์อินทรีย์เกือบทั้งหมด ลักษณะเหล่านี้สะท้อนถึงวงจรชีวิตที่ผิดปกติของเซลล์อะมีโลบลาสต์และ ลักษณะเฉพาะทางเคมีกายภาพของโปรตีนเมทริกซ์ที่ควบคุมการก่อตัวของผลึกเคลือบฟันที่ยาวมาก แม้ว่าเคลือบฟันจะมีลักษณะทางโครงสร้างที่โดดเด่นจากเนื้อเยื่อที่ตกตะกอนจากคอลลาเจน แต่ก็มีความคล้ายคลึงกันพื้นฐานและรูปแบบทั่วไปในการก่อตัวของเนื้อเยื่อชนิดแข็งทั้งหมด

โครงสร้างของเคลือบฟัน [25, 26]

เนื่องจากธรรมชาติของเคลือบฟันมีแร่ธาตุสูง เป็นโครงสร้างที่ยากต่อการศึกษาเมื่อตรวจสอบส่วนที่ปราศจากแร่ธาตุแบบเต็มแล้ว จะเห็นเฉพาะพื้นที่ว่างในพื้นที่ที่เคยเคลือบด้วยสารเคลือบฟันที่โตเต็มที่ที่อยู่ก่อนหน้านี้ เนื่องจากแร่ธาตุถูกละลายและมีสารอินทรีย์ที่มีร่องรอยถูกชะล้างออกไป

สารเคลือบฟัน สร้างจากผลึกคาร์บอนอะพาไทต์ (carbonatoapatite crystals) ที่คล้ายริบิ้นที่อัดแน่นและยาว ที่มีความกว้าง 60 ถึง 70 นาโนเมตร และความหนา 25 ถึง 30 นาโนเมตร คริสตัลมีลักษณะยาวมาก นักวิจัยบางท่านเชื่อว่าความยาวของผลึกจะหมายถึงความหนาทั้งหมดของชั้นเคลือบฟัน เซลล์หน่วยแคลเซียมฟอสเฟตมีความสมมาตรแบบหกเหลี่ยมและเรียงซ้อนกันเพื่อสร้างโครงร่างหกเหลี่ยมให้กับคริสตัล ซึ่งมองเห็นได้ชัดเจนในลักษณะภาพตัดขวางในเคลือบฟันที่เจริญเต็มที่ อย่างไรก็ตามผลึกเคลือบฟันที่เจริญเต็มที่แล้วจะไม่มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมอย่างสมบูรณ์แต่จะแสดงโครงร่างที่ไม่เรียบ เนื่องจากพวกมันถูกกดทับกันในช่วงสุดท้ายของการเจริญเติบโต คริสตัลเหล่านี้ถูกจัดกลุ่มเข้าด้วยกันเป็นแท่งเคลือบฟัน (rod) หรือ อินเตอร์รอต (interrod)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบฟันประกอบด้วยเซลล์ผสมกันเซลล์เหล่านี้ได้แก่ อะมีโลบลาสต์ (Ameloblast) ซึ่งมีหน้าที่หลักในการสร้างสารเคลือบฟันและการทำให้เป็นเนื้อเยื่อแข็งและก่อตัวเป็นชั้นเดียวที่สัมผัสโดยตรงกับพื้นผิวเคลือบฟันที่กำลังก่อตัว กระบวนการสร้างเคลือบฟันเรียกว่า อะมีโลเจเนซิส (Amelogenesis) มีกระบวนการสองขั้นตอน เมื่อเคลือบฟันเริ่มก่อตัวขึ้น มันจะเกิดแร่เพียงบางส่วนประมาณร้อยละ 30 ต่อมาเมื่อเมทริกซ์อินทรีย์แตกตัวและถูกดึงออก ผลึกก็จะกว้างขึ้นและหนาขึ้น กระบวนการนี้ทำให้เมทริกซ์อินทรีย์และน้ำสูญเสียไปและแร่ธาตุจะถูกเติมลงไปหลังจากที่ชั้นเคลือบฟันเคลือบหนาเต็ม ที่เพื่อให้ได้ปริมาณแร่ธาตุมากกว่า ร้อยละ 96 โปรตีนเมทริกซ์ของเคลือบฟันจะถูกหลั่งโดยอะมีโลบลาสต์เข้าไปในช่องว่างของเคลือบฟันและจะถูกย่อยสลายโปรตีนในเวลาต่อมา เคลือบฟันที่ขึ้นรูปแล้วมีลักษณะเป็นแท่งปริซึมที่มีลักษณะเฉพาะที่ประกอบด้วยแท่งโดยแต่ละอัน ประกอบด้วย อะมีโล บลาสต์เดี่ยวและขยายจากรอยต่อฟัน-เคลือบฟัน (Dentino-enamel junction, DEJ) ไปจนถึงพื้นผิวเคลือบฟัน และเคลือบฟันแบบอินเตอร์รอกที่ตั้งอยู่รอบแท่งเคลือบฟัน ในเคลือบฟันที่ก่อตัวเต็มที่ จะมีคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาและชีวกลศาสตร์ที่เป็นเอกลักษณ์โดยน้ำหนักรวมของเคลือบฟันที่เจริญเต็มที่จะมีแร่ธาตุประมาณร้อยละ 95 วิสคูอินทรีย์ประมาณร้อยละ 1-2 และน้ำประมาณร้อยละ 2-4

ในที่สุด เมื่อชั้นเคลือบฟันเจริญเต็มที่ ชั้นอะมีโลบลาสต์และชั้นปาปิลารีที่อยู่ติดกันจะถดถอยและรวมกันเป็นเยื่อผิวเคลือบฟันที่ลดลง อะมีโลบลาสต์จะลดขนาดลง และจะมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ต่ำถึงแบนเยื่อผิวเคลือบฟันนี้แม้ว่าจะไม่ได้เกี่ยวข้องกับการหลั่งและการเจริญเต็มที่ของเคลือบฟันอีกต่อไป แต่ยังคงปกคลุมอยู่และมีหน้าที่ป้องกันในกรณีของเยื่อชั้นนี้แต่มีการเสนอว่าเซลล์เนื้อเยื่อเกี่ยวพันจะมาสัมผัสกับสารเคลือบฟันและสะสมวัสดุที่มีลักษณะคล้ายสารเคลือบฟันไว้บนนั้น อย่างไรก็ตาม ในระหว่างขั้นตอนการป้องกันนี้ องค์ประกอบของเคลือบฟันยังสามารถปรับเปลี่ยนได้ ตัวอย่างเช่น ฟลูออไรด์ (ถ้ามี) ยังสามารถรวมเข้ากับเคลือบฟันของฟันที่ยังไม่ขึ้นและมีหลักฐานบ่งชี้ว่าปริมาณฟลูออไรด์มีปริมาณมากที่สุดในฟันเหล่านั้นจะอยู่ที่ช่องว่างระหว่างการสร้างเคลือบฟันที่เสร็จสมบูรณ์และในขณะที่ฟันขึ้น (ในขณะนั้น อะมีโลบลาสต์จะหายไป) เยื่อผิวเคลือบฟันที่ลดลงจนกว่าฟันจะขึ้นเมื่อฟันเคลื่อนผ่านทะเลเยื่อผิวในช่องปากส่วนของเยื่อผิวเคลือบฟันที่ลดลงที่ตั้งอยู่ที่ปลายฟันจะถูกสลายไป

เคลือบฟันเป็นเนื้อเยื่อที่มีแร่ธาตุสูงที่สุดในร่างกายมนุษย์และมีแร่ธาตุมากกว่าโครงสร้างฟันส่วนอื่นๆ ทำหน้าที่ปกป้องเนื้อฟันและโพรงประสาทฟัน สารเคลือบฟันไม่มีคอลลาเจนและเมื่อก่อตัวแล้วจะปราศจากเซลล์ใดๆ ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างใหม่ได้

คุณสมบัติทางกลที่โดดเด่นของเคลือบฟัน [27, 28]

เคลือบฟันเป็นสิ่งที่รวมเอาความแข็งและความยืดหยุ่นเข้ากับความยึดหยุ่นเป็นพิเศษซึ่งช่วยให้ทนต่อการบดเคี้ยวหลายร้อยรอบด้วยแรงกัดสูงถึง 770 นิวตัน ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องปาก ซึ่งผ่านค่าพีเอชที่รุนแรงและอุณหภูมิผันผวนอย่างมากภายในร่างกายมนุษย์ แม้จะไม่ได้สร้างใหม่หรือซ่อมแซม แต่ก็ใช้งานได้นานหลายทศวรรษโดยไม่เกิดการถูกทำลายที่รุนแรงและเคลือบฟัน ประกอบด้วยแร่ธาตุแข็ง ไฮดรอกซีอะพาไทด์บรรจุที่ความหนาแน่นสูง (ร้อยละโดยน้ำหนัก 95 ในเคลือบฟันที่เจริญเต็มที่) โดยมีเมทริกซ์อินทรีย์อ่อนเพียงร้อยละโดยน้ำหนัก 1 และน้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก 4 เช่นเดียวกับแร่ธาตุชีวภาพอื่นๆ จะต้องเติมพื้นที่เพื่อต้านทานแรง เคลือบฟันเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตที่มีลำดับชั้นซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งเป็นหลักสำคัญสู่ประสิทธิภาพเชิงกล

โครงสร้างหลักของเคลือบฟัน คือแท่งเคลือบฟัน (enamel rod)—ซึ่งเป็นผลึกอะพาไทด์ที่เรียงชิดกัน เมื่อพูดถึงการจัดแนวสัญญาณวิทยาของผลึกที่ยึดออก ผลึกแท่งเคลือบฟันทั่วไปในเคลือบฟันที่เจริญเต็มที่ จะมีความกว้างประมาณ 50 นาโนเมตร (26 นาโนเมตร คูณ 63 นาโนเมตรตามการศึกษาของ ดาคูลิสและคีรีเบล และยาวมากกว่า 1 ไมครอน ผลึกที่ยึดออกในแต่ละแท่งเคลือบฟันจะขนานกัน แต่ละแท่งเคลือบฟันยังสัมพันธ์กับอินเตอร์รอท ซึ่งประกอบด้วยคริสตัลที่จัดเรียงเป็นมุมประมาณ 60 องศา กับแกนของแท่งเคลือบฟันและวิ่งจากรอยต่อของเนื้อฟัน-เคลือบฟันไปยังพื้นผิวของเคลือบฟัน โดยมีวิธีเป็นคลื่นในชั้นเคลือบฟันชั้น ในเคลือบฟันเป็นสารที่แข็งที่สุดในร่างกายมนุษย์และทำหน้าที่เป็นชั้นนอกที่ทนต่อการสึกหรอของตัวฟัน เป็นเกราะป้องกันฟันจากแรงทางกายภาพ ความร้อนและสารเคมีที่อาจเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อที่สำคัญในเนื้อฟันที่อยู่ภายใน และเนื่องจากคุณสมบัติทางแสงของสารเคลือบฟันนั้นได้มาจากโครงสร้างและองค์ประกอบของมันเช่นกันทำให้เป็นอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความทึบแสงและ/หรือ สีของโครงสร้างเคลือบฟันนั่นเอง

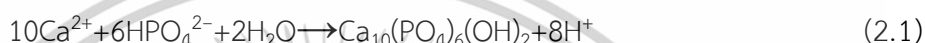
เคลือบฟันเป็นเนื้อเยื่อที่มี มอดูลัสยังอยู่ระหว่าง 70 ถึง 100 จิกะปาสกาล ขึ้นอยู่กับประเภทฟันและ อายุของฟัน (ฟันหน้า ฟันกราม) ภายใต้ชั้นเคลือบฟัน คือชั้นเนื้อฟันเป็นโครงสร้างเกี่ยวพันที่มีแร่ธาตุ ประกอบด้วย ไฮดรอกซีอะพาไทด์ร้อยละ 45 วัสดุอินทรีย์ร้อยละ 33 และน้ำร้อยละ 22 เฟสของสารอินทรีย์ของเนื้อฟันส่วนใหญ่เป็นคอลลาเจนประเภทที่หนึ่ง ร้อยละ 90% โดยมีร้อยละต่ำของคอลลาเจนประเภทที่สามและห้าและไฟโบรเนกติน และโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนที่อุดมด้วยน้ำร้อยละ 10 (โปรตีโอไกลแคนและไกลโคซามิโนไกลแคน) อยู่ที่ส่วนต่อประสานของเคลือบฟันและเนื้อฟัน ปริซึมบริเวณเฉพาะนี้เรียกว่า รอยต่อของเคลือบฟันและเนื้อฟัน ผลลัพธ์ของโครงสร้างนี้มีความยืดหยุ่นอย่างไม่น่าเชื่อ ในช่วงชีวิตของฟันในแต่ละวันฟันภายใต้การรับแรงหลายพันครั้งในการรับประทานอาหารที่สามารถรับแรงได้สูงถึง 1,000 นิวตัน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 700 นิวตัน ขึ้นอยู่กับเพศ อายุ น้ำหนัก และพยาธิวิทยา เคลือบฟันมีความแข็งแรงมากแต่เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเปราะบาง ความเหนียวแตกหักของสารเคลือบฟันภายนอกและภายในถูกกำหนดขึ้นในการทดลองการพัฒนาของรอยแตกแบบควบคุมที่ 0.67 ± 0.12 เมกะปาสคาลเมตรยกกำลังเศษหนึ่งส่วนสอง ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) และ 1.13–3.93 เมกะปาสคาลเมตรยกกำลังเศษหนึ่งส่วนสองตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกของอะพาไทต์ (Apatite crystals) [29]

แคลเซียม (Ca^{2+}) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ไอออนสามารถละลายได้เพียงเล็กน้อยในน้ำและทำให้ตกตะกอนที่ความเข้มข้นค่อนข้างต่ำในรูปของผลึกหรือรูปของแข็งภายใต้สภาวะทางสรีรวิทยา อะพาไทต์มีความสามารถในการละลายต่ำที่สุดในบรรดาแร่ธาตุแคลเซียม ฟอสเฟต ดังนั้นจึงเป็นเฟสที่เสถียรที่สุดทางเคมี ดังนั้น อะพาไทต์จึงเป็นส่วนประกอบอนินทรีย์ในเนื้อเยื่อที่มีแร่ธาตุทั้งหมดในสัตว์มีกระดูกสันหลัง

ในสารละลายแคลเซียมฟอสเฟตในน้ำอิมิตัวที่มีช่วงพีเอช ทางสรีรวิทยา (6.0 ถึง 7.4) การตกตะกอนของสารปริมาณสารสัมพันธ์ไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถเกิดขึ้นได้ตามปฏิกิริยาต่อไปนี้ (สมการที่ 2.1)



การตกตะกอนของไฮดรอกซีอะพาไทต์หนึ่งโมลจะส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยโปรตอนแปดตัวซึ่งจะทำให้สารละลายเป็นกรดไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นโครงตาข่ายคริสตัลหกเหลี่ยมแบบสมมาตรและประกอบด้วยฟอสเฟตเตตระฮีดรอล (PO_4^{3-} tetrahedral) ที่ประสานกับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) ตำแหน่งไอออนแคลเซียมในแลตทิซของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP-lattice) มีอยู่สองประเภทซึ่ง ไอออนแคลเซียมมีลักษณะเฉพาะเนื่องจากสร้างช่องสัญญาณที่ยอมให้ไอออนลบ (Anion) เคลื่อนที่ไปตามแกนของผลึกอะพาไทต์ไฮดรอกซิลไอออนสามารถกระจายและถูกแทนที่ด้วยไอออนอื่นๆ เช่น ฟลูออไรด์ (F^-), คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) หรือคลอไรด์ (Cl^-) จากสารละลายที่เป็นน้ำ สิ่งนี้ทำให้องค์ประกอบของอะพาไทต์สามารถปรับให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของสารละลายได้อย่างมาก ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของอะพาไทต์ทางชีวภาพแคลเซียมจะช่วยรักษาความเป็นกลางเมื่ออิเล็กตรอนของแคลเซียมหมด หมู่ฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) จะถูกโปรตอนและ/หรือหมู่ฟอสเฟตจะถูกแทนที่ด้วย คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) และยังสามารถแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลกลุ่มสองตามช่องธาตุแคลเซียม

2.1.2 โครงสร้างเนื้อฟัน

เนื้อฟันเป็นเนื้อเยื่อที่ปราศจากหลอดเลือดที่มีสีเหลืองที่ก่อตัวขึ้นเป็นกลุ่มของฟันเนื้อฟันเป็นวัสดุที่มีความแข็ง โดยมีแร่ธาตุอยู่ที่ร้อยละ 70 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตบางส่วนและเมทริกซ์อินทรีย์ร้อยละ 20 (คอลลาเจนชนิดที่ 1 ไกลโคซามิโนไกลแคน และฟอสโฟโปรตีน) [13]

ลักษณะทางกายภาพของเนื้อฟัน

ลักษณะเด่นของเนื้อฟันคือรูปแบบการเรียงตัวของท่อเนื้อฟันที่เป็นระเบียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ไมครอนซึ่งขยายจากผิวโพรงประสาทฟันไปยังรอยต่อของเคลือบฟันกับเนื้อฟันมีลักษณะ

เป็นท่อที่มีการแตกแขนงด้านข้างและปลายใกล้กับรอยต่อเคลือบฟันกับเนื้อฟันและอาจยื่นเข้าไปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบฟันในระยะสั้นๆ (enamel spindles) ท่อแต่ละอันล้อมรอบด้วยส่วนยื่นของไฮโดพลาสซึมของโอดอนโทบลาสต์ ซึ่งตัวเซลล์ของโอดอนโทบลาสต์ ที่อยู่ในชั้นชูโดสเตรทิฟายด์ (pseudostratified) ซึ่งวางบนพื้นผิวโพรงประสาทฟัน กระบวนการต่างๆนี้เชื่อกันว่าเป็นการขยายความหนาของเนื้อฟันได้เต็มที่ในฟันที่เพิ่งขึ้นใหม่แต่ในฟันคนสูงอายุ กระบวนการเหล่านี้อาจถูกถอนออกบางส่วนและสามารถเกิดขึ้นได้เพียงส่วนที่สามของโพรงประสาทฟัน ในขณะที่บริเวณด้านนอกอาจมีเพียงของเหลวนอกเซลล์ (extracellular fluid) เท่านั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเนื้อฟันจะแคบลงโดยการสะสมของเนื้อเยื่อรอบท่อ (peritubular dentine) ซึ่งแตกต่างจากเนื้อฟันระหว่างท่อ (intertubular dentine) เนื่องจากเนื้อฟันระหว่างท่อมีแร่ธาตุสูงและขาดเมทริกซ์คอลลาเจน จึงสามารถระบุเนื้อเยื่อรอบท่อได้ด้วยการถ่ายภาพรังสีไมโครเมื่อเวลาผ่านไปมันอาจเติมเต็มท่อทูลซึ่งเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดเนื้อฟันโปร่งแสงและเริ่มขึ้นที่บริเวณปลายสุดของรากฟัน

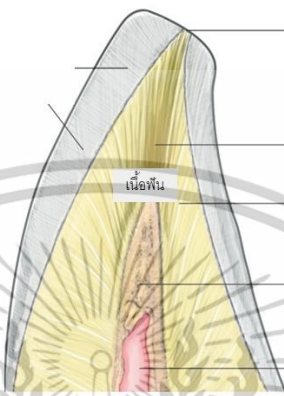
โครงสร้างของเนื้อฟัน [30]

เนื้อฟันก่อตัวขึ้นอย่างช้าๆตลอดชีวิต ดังนั้นจึงมีปริเดนทีน (predentine) ที่ไม่มีแร่ธาตุที่พื้นผิวของเนื้อฟันที่มีแร่ธาตุอยู่เสมอ ซึ่งอยู่ติดกับชั้นเคลือบฟันที่บริเวณขอบของเนื้อฟัน การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีภายในเมทริกซ์ หมายความว่า มีการติดสีของปริเดนทีน ต่างจากเมทริกซ์ของเนื้อฟันที่มีแร่ธาตุโดยทั่วไป แล้วเส้นขอบของปริเดนทีนกับเนื้อฟันจะมีลักษณะเป็นสเกลลอป เนื่องจากเนื้อฟันสร้างแร่ธาตุทั้งแบบเส้นตรงและเป็นผลึกมวลรวมทรงกลมของผลึก (calcospherites) เนื้อฟันเช่นเดียวกับเคลือบฟันจะถูกสะสมแบบทีละชั้น และแสดงเส้นที่เพิ่มขึ้นทั้งเส้นสั้นและยาว เส้นยาวเรียกว่าเส้นแอนเดรเซน (Andresen) และในบริเวณแกนกลางจะห่างกันประมาณ 20 ไมครอน พวกมันแสดงถึงการเพิ่มขึ้นประมาณ 6-12 วัน เส้นที่เพิ่มขึ้นรายวัน เส้นวอน เอ็บบเนอร์ (von Ebner) ในระนาบแกนกลางมักจะห่างกัน 4 ไมครอน พวกมันอยู่ใกล้กันมาก (ห่างกัน 1-2 ไมครอน) ที่รอยต่อเคลือบฟัน-เนื้อฟันและในส่วนรากฟัน เมื่อเกิดแร่ธาตุขึ้น (เช่น ฟันน้ำนมทั้งหมดและโดยปกติฟันกรามถาวรซี่แรก) เส้นนีโอเนแทล (neonatal line) จะก่อตัวขึ้นในเนื้อฟันคล้ายกับที่เห็นในเคลือบฟัน และส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันทั้งในสภาพแวดล้อมและโภชนาการที่เกิดขึ้นตั้งแต่แรกเกิด เช่นเดียวกับเคลือบฟัน ความผิดปกติของการเจริญเติบโตของเนื้อฟันจะแสดงเป็นเส้นที่เน้นซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าเส้นคอนทัวร์ของโอเวน (contour lines of Owen)

การก่อตัวของเนื้อฟันปฐมภูมิ (Primary dentine) เกิดขึ้นที่อัตราคงที่แต่ลดลงตั้งแต่ครั้งแรกที่ตัวฟันและรากฟันที่ถูกสร้างเสร็จสมบูรณ์ การสะสมของเนื้อฟันที่ช้าและไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อฟันทุติยภูมิ (secondary dentine) จะดำเนินต่อไปตลอดชีวิตและลดขนาดของช่องโพรงประสาทฟันลงอีก มันแตกต่างจากเนื้อฟันหลักโดยการลดลงและการจัดเรียงของท่อฟันภายในน้อยกว่าปกติ การปรากฏของส่วนยื่นของเซลล์สร้างเนื้อฟันที่เรียกว่าโอดอนโทบลาสต์ หมายความว่าเนื้อฟันที่ยังมีชีวิตมันจะทำการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอกที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ฟันผุที่ลุกลามอย่างรวดเร็ว การสึกมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินไป หรือการแตกหักของฟัน โดยการสร้างบริเวณที่ตายแล้วที่มีแร่ธาตุต่ำ ซึ่งไอออนโทปลาสต์ตรงบริเวณที่ได้รับผลกระทบนั้นจะตายและท่อยังคงว่างเปล่าซึ่งจะเป็นเนื้อฟันตติยภูมิ (tertiary dentine) ทางเดินที่ตายแล้วอาจถูกปิดผนึกจากเนื้อฟันโดยบริเวณบางๆ ของเนื้อฟันชนิดสเคอโรติกและการสะสมของเนื้อฟันที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นเนื้อฟันตติยภูมิโดยอยู่ใกล้และแยกออกจากเซลล์โพรงประสาท (รูปที่ 2)



รูปที่2 ส่วนแนวยาวของฟันหน้า

ชั้นเนื้อฟันถูกสร้างจากเนื้อเยื่อฟันที่มีแร่ธาตุจำนวนมาก เนื้อฟันถูกครอบด้วยตัวฟันที่เคลือบด้วยแร่ธาตุสูงซึ่งเป็นส่วนเคลือบฟัน และบริเวณรากฟันนั้น เคลือบด้วยเคลือบรากฟันซึ่งเป็นโครงสร้างที่เชื่อมระหว่างฟันเข้ากับกระดูกเบ้าฟัน องค์ประกอบทั่วไปของเนื้อฟัน ได้สรุปดังนี้ เฟสแร่ (Mineral phase) ร้อยละ 70 ตามน้ำหนักและร้อยละ 40-45 ตามปริมาตร เนื้ออินทรีย์ (Organic matrix) ร้อยละ 20 ตามน้ำหนักและร้อยละ 30 ตามปริมาตรและน้ำร้อยละ 10 ตามน้ำหนักและร้อยละ 20-25ตามปริมาตร ซึ่งส่วนประกอบของเนื้อฟัน เมื่อพิจารณาตามน้ำหนัก เนื้อฟันจะมีแร่ธาตุน้อยกว่าเคลือบฟัน (น้ำหนักร้อยละ 96) แต่มากกว่ากระดูกหรือเคลือบรากฟัน (น้ำหนักประมาณร้อยละ 65)

คุณสมบัติที่โดดเด่นของเนื้อฟัน [31]

ลักษณะเฉพาะของเนื้อฟันทางสรีรวิทยาและกายวิภาคเนื้อฟันเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน การศึกษาสายวิวัฒนาการได้เปิดเผยว่าในระหว่างวิวัฒนาการเดิมที่ลักษณะของเนื้อฟันมีความคล้ายคลึงกับกระดูกมากโดยมีเซลล์คล้ายเซลล์สร้างกระดูก/เซลล์ที่มีลักษณะคล้ายเซลล์ไอออนโทปลาสต์ (odontoblast-like cells) อยู่ภายในโพรงกระดูก เนื่องจากเป็นกรณีของเซลล์สร้างกระดูกที่ล้อมรอบภายในโพรงกระดูก เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 ไมครอน จำนวนของท่อเนื้อฟันอยู่ที่ประมาณ 18,000 และ 21,000 ท่อต่อตารางมิลลิเมตร โดยเนื้อฟันชั้นนอกไม่ได้รับอิทธิพลจากสถานะของฟอสฟอรัสอินทรีย์ เป็นผลให้ในตัวฟันชั้นนอกจะมีแร่ธาตุน้อยกว่าส่วนที่เหลือของเนื้อฟัน ทำให้คุณสมบัติทางกลมีการยืดหยุ่นและยังช่วยให้เกิดการกระจายแรงเค้นอย่างไรก็ตามความหนาของชั้นนอกประมาณ 200 มิลลิเมตร ความหนาของฟันจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ประมาณ 4 มิลลิเมตร/เอกสาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัน) โดยกินพื้นที่เข้าไปทางด้านในของโพรงประสาทฟัน บริเวณรากฟัน โมดูลัสยืดหยุ่นจะไม่สม่ำเสมอ และส่วนนอกเป็นโครงที่สามารถต้านทานแรงกดในแนวแกนและด้านข้างได้ จากมุมมองเชิงโครงสร้าง

โมดูลัสความแข็งและยืดหยุ่นของเนื้อฟัน

การศึกษาคุณสมบัติทางกลของเนื้อฟันโดยเน้นไปที่คุณสมบัติของโครงสร้างจุลภาค คล้ายกับการศึกษาคุณสมบัติทางกลของเคลือบฟัน อย่างไรก็ตาม เนื้อฟันมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของฟัน ได้แก่ ตำแหน่ง ความหนาแน่น และทิศทางของท่อเนื้อฟัน ทิศทางของเส้นใยคอลลาเจน และความหนาแน่นเฉลี่ยของเฟสแร่ ผลลัพธ์ของคุณสมบัติทางกลของฟันจะแตกต่างกันไปในแต่ละการศึกษา

คุณสมบัติทางกลของเนื้อฟันจะแตกต่างกันไปตามปริมาณแร่ธาตุ เนื้อฟันรอบท่อที่มีแร่ธาตุสูง มีโมดูลัสของยังอยู่ที่ 40–42 จิกะปาสคาล ในขณะที่เนื้อเยื่อระหว่างท่อจะมีแร่ธาตุน้อยมีโมดูลัสของยังที่ 17 จิกะปาสคาล และเนื้อฟันส่วนที่ใกล้กับโพรงประสาทฟัน ความแข็งของเนื้อฟันรอบท่อแสดงการเปลี่ยนแปลงการไล่ระดับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแร่ธาตุ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่รอยต่อระหว่างเคลือบฟันและเนื้อฟัน แองเคอและคณะ [32, 33] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลและส่วนประกอบแร่ธาตุของเนื้อฟันบริเวณที่ผู้ พบว่ามีการลดลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและมีการลดลงของความแข็งของเนื้อฟันผู้ โดยมีความสัมพันธ์โดยตรงและมีความสัมพันธ์กับปริมาณแร่ธาตุ ความโปร่งใสและความเข้มข้นของแร่ธาตุจะเพิ่มขึ้นตามอายุของเนื้อฟัน ในขณะที่ขนาดของผลึกจะลดลง อย่างไรก็ตามโมดูลัสยืดหยุ่นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่ลดลงและการสะสมของแร่ธาตุในท่อของเนื้อฟัน ทำให้เนื้อฟันบริเวณที่โปร่งใสเกิดแตกหักขึ้นและ เกิดการก่อตัวและการเติบโตของรอยร้าวขนาดเล็ก ความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นของเนื้อฟันจะแตกต่างกันไปเล็กน้อยตามอายุ อย่างไรก็ตามเนื้อฟันจะเปราะมากขึ้นด้วยการสะสมของแร่ธาตุ ดังนั้นความจุฟเฟอร์จะลดลงและฟันมีแนวโน้มที่จะแตกร้าวมากขึ้น กลไกการป้องกันและการรักษาความเปราะบางของเนื้อฟันต้องมีการตรวจสอบเพิ่มเติม

คุณสมบัติทางกลของเนื้อฟันมีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับโครงสร้างภายในและองค์ประกอบตลอดจนสภาพแวดล้อมภายนอก [34] การศึกษาแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงร้อยละ 35 และความแข็งลดลงร้อยละ 30 ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น เคนนี่และคณะ [35] ยืนยันว่าเนื้อฟันเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ในสภาพแวดล้อมที่ชื้น ค่าของอี เท่ากับ 25.1 จิกะปาสคาล ในทิศทางตั้งฉากกับท่อ ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าในทิศทางขนานเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเนื้อฟันกลายเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) ในสภาพแวดล้อมที่แห้ง โดยค่าอี เท่ากับ 28.1 จิกะปาสคาล อีกการศึกษาหนึ่งพบว่าปฏิกิริยายืดหยุ่นของเนื้อฟันนั้นแรงกว่าในสภาพแวดล้อมที่แห้ง ในขณะที่ความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง การศึกษาเหล่านี้บ่งชี้ว่าคุณสมบัติทางกลของเนื้อฟันได้รับอิทธิพลอย่างมากจากสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

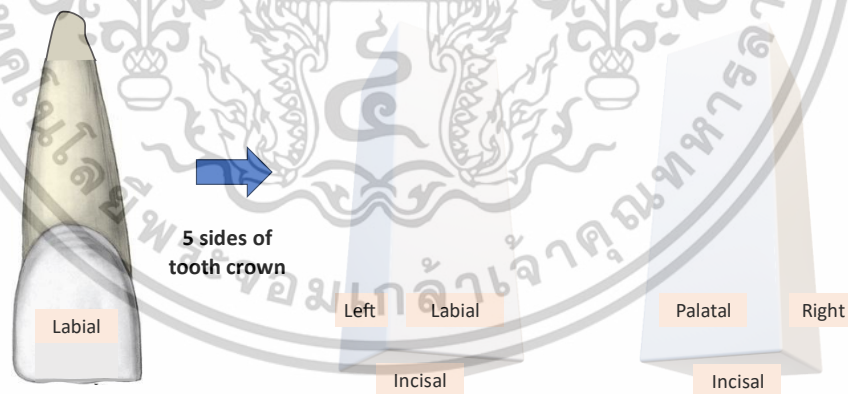
ล่อม ดังนั้นควรคำนึงถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในการศึกษาวิจัยด้วย คุณสมบัติทางกลระดับมหภาค และจุลภาคของเนื้อฟันแตกต่างกันไปในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน คำถามที่ว่าความสามารถในการต้านทานแรงภายนอก การก่อตัวของการร้าวและการเปลี่ยนแปลงของการเติบโตในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันนั้นมีความจำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามแนวทางการศึกษาประยุกต์ใช้และปรับปรุงเทคนิคการรักษาทางคลินิกยังคงสามารถพัฒนาได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับฟันที่มีการรักษาคลองรากฟัน

คุณสมบัติทางกลของฟันได้รับอิทธิพลอย่างมากจากสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นภายหลังการรักษา ดังนั้นควรพิจารณาการใช้สารช่วยหล่อลื่นให้เกิดความชุ่มชื้นในการทำการรักษา

2.2 การแบ่งด้านของฟันตามชื่อเรียกทางทันตกรรม

ด้านของตัวฟัน (Dental crown) มีทั้งหมดอยู่ 5 ด้าน [36] ตามรูปที่ 3

1. ด้านริมฝีปาก (Labial)
2. ด้านเพดานปากหรือด้านลิ้น (Palatal หรือ Lingual)
3. ด้านประชิดใกล้กลาง (Mesial ในที่นี้คือด้าน Right)
4. ด้านประชิดไกลกลาง (Distal ในที่นี้คือด้าน Left)
5. ด้านปลายฟันตัดหรือด้านบดเคี้ยว (Incisal (edge) หรือ Occlusal)



รูปที่3 การเรียกชื่อด้านแต่ละด้านของฟันทางทันตกรรม

2.3 เซรามิกและโครงสร้างเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซรามิกเป็นวัสดุอินทรีย์ [37] ที่มีมาหลายพันปีแล้วในรูปของเซรามิกดั้งเดิม ใช้ในการผลิตเครื่องใช้ในครัวเรือน อิฐทนไฟ เป็นต้น ในปัจจุบันเซรามิกเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ทั้งทางด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรมการแพทย์ ทันตกรรมต่างๆซึ่งคุณสมบัติของเซรามิกโดยทั่วไปมีความแข็งแรงสูง มีการยึดตัวต่ำ มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ทนต่อสารเคมีและมีจุดหลอมเหลวสูง ทนต่อแรงกดได้มากกว่าแรงดึงมากถึง 5-10 เท่า เซรามิกถูกแบ่งออกได้ดังนี้ วัสดุอินทรีย์พหุผลึกและผลึกเดี่ยว แก้วเซรามิก เป็นต้น

โครงสร้างของเซรามิก [37] ประกอบด้วย ธาตุโลหะและอโลหะยึดกันด้วยพันธะไอออนิกและหรือพันธะโควาเลนต์ รวมกัน โดยมีโลหะอื่นเป็นองค์ประกอบดังนี้ อลูมิเนียม (Al), ซิลิกอน (Si), แมกนีเซียม (Mg), ไททาเนียม (Ti), เบอริลเลียม (Be) และโบรอน (B) ส่วนอโลหะ ได้แก่ ออกซิเจน (O), คาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ (Oxides), คาร์ไบด์ (Carbides) หรือไนไตรด์ (Nitride) เป็นต้น โดยโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกับโลหะ แต่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระมากเหมือนโลหะซึ่งพันธะระหว่างอะตอมของเซรามิกนั้น ถ้าเป็นพันธะไอออนิกจะให้ความเสถียรสูงและมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะและวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุเซรามิกเปราะ ไม่เหนียวมีความแข็งแรงสูง โดยมีความต้านแรงดึงสูงถึง 0.3-0.4 เมกะปาสคาล แต่วัสดุเซรามิกทนต่อสารต่างๆได้ดี ยกเว้นต่อกรดไฮโดรฟลูออริกและสารละลายคอสติคหรือโซดาไฟ

2.3.1 ประเภทของครอบฟันและการพัฒนาครอบฟันที่ใช้ในคลินิกทันตกรรม

ครอบฟันที่ใช้ทางทันตกรรม ประเภทเซรามิกนั้นเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ขึ้นกับองค์ประกอบของวัสดุ คุณสมบัติที่ใช้ในการเผา จนไปถึงการขึ้นรูปของวัสดุเป็นต้น [37-40] โดยในที่นี้ขอแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามองค์ประกอบของวัสดุ

1. เซรามิกดั้งเดิม เป็นเซรามิกชนิดแรกที่นำมาใช้ทางทันตกรรมโดยมีส่วนประกอบเฟลด์สปาร์ (feldspar) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเซรามิกชนิดนี้ เมื่อผ่านกระบวนการ โครงสร้างนี้จะเกิดการสลายเป็นกลาสเมทริกซ์ (glass matrix) และมีการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรผลึก (crystalline phase) โดยส่วนของกลาสเมทริกซ์ มีคุณสมบัติเหมือนแก้วทุกประการ เช่น ความเปราะ (Brittle) ความโปร่งแสง (Translucency) การแตกหักง่าย (Fragile) และส่วนของวัฏจักรผลึกคือจากผลึกลูไซท์ (leucite) ซึ่งมีสูตร $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สร้างความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยข้อจำกัดของผลึกนี้คือความขุ่น ยังมีผลึกนี้ปริมาณมากเพียงใดก็ยิ่งทำให้ความสวยลดลง โดยเซรามิกชนิดนี้จะมีผลึกลูไซท์ ร้อยละ 15.0-25.0 ทำให้ความแข็งแรงต่ำ ความแข็งแรงดัด (flexural strength) อยู่ที่ 30-40 เมกะปาสคาล ซึ่งไม่สามารถนำมาทำครอบฟันเซรามิกทั้งซี่ได้ (all-ceramic crown) จึงมีความจำเป็นในการนำใช้ในครอบฟันโลหะเคลือบเซรามิก (porcelain fused to metal crown) ได้แก่ ซีรามโค (Ceramco) ของบริษัทเดนทาสพาย ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นต้น เนื่องจากมีโครงโลหะที่อยู่ภายในทำให้เกิดความทึบแสง (Opacity) จึงทำให้มีข้อจำกัดเรื่องความสวยงามในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้งานของครอบฟันบริเวณฟันหน้าบนในทางคลินิก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาครอบฟันชนิดนี้ให้มีความแข็งแรงขึ้น

2. เซรามิกชนิดกลาสเซรามิก (Glass Ceramics) เป็นเซรามิกที่มีการพัฒนาความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งเป็นการผ่านขบวนการครีมีนึ่งซึ่งเป็นกระบวนการควบคุมการเกิดผลึกด้วยความร้อนร่วมกับการใส่สารนิวคลีเอตติ้ง ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึกในเซรามิก (Crystallization) ปริมาณผลึกจะมากขึ้นเมื่อผ่านความร้อนตามระยะเวลาที่เหมาะสมทำให้เกิดความแข็งแรงเพียงพอต่อการทำครอบฟันชนิดครอบฟันเซรามิกทั้งซี่

โดยกลาสเซรามิก สามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิด ขึ้นกับชนิดของผลึกที่เกิดขึ้น ดังนี้

2.1 กลาสเซรามิกชนิดฟลูออโรไมคา เป็นกลาสเซรามิกกลุ่มแรกซึ่งมีปริมาณผลึกของเททระซิลิกฟลูออโรไมกา มีสูตรดังนี้ $K_2Mg_5Si_8O_{20}F_4$ ถึงร้อยละ 55.0 โดยมีความโปร่งแสงสูง (High translucency) และค่าดัชนีการหักเหของแสง ใกล้เคียงกับของกลาสเซรามิกและยังมีคุณสมบัติ อิทธิพลเหมือนเคมีเลียนคือเป็นคุณสมบัติที่สีบางส่วนของเซรามิกจะถูกดึงออกมาจากฟันข้างเคียงและ การที่มีองค์ประกอบของฟลูออไรด์ ทำให้มีความวาวเหมือนฟันธรรมชาติ ค่าความแข็งแรงแรงดัดอยู่ที่ 135 เมกะปาสคาล ปัจจุบันไม่ค่อยนิยมเนื่องจากแตกหักง่ายและขั้นตอนในการทำขึ้นงานยุ่งยาก

2.2 กลาสเซรามิกชนิดเสริมความแข็งแรงด้วยลูไซต์ เป็นการเพิ่มปริมาณผลึกลูไซต์ เป็นร้อยละ 40 ซึ่งทำให้เซรามิกชนิดนี้ไม่เพียงแต่มีความแข็งแรงมากขึ้นแล้ว การที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับอุณหภูมิ (coefficient of thermal expansion; CTE) มีค่าสูงกว่ากลาสเซรามิกภายหลังการขึ้นรูปเมื่ออุณหภูมิลดลงซึ่งจะเกิดแรงอัดภายในขึ้น ที่เรียกว่า แรงอัดภายในกลาสเมทริกซ์ (tangential compressive stress) แรงอัดภายในที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการร้าวได้ทำให้เป็นการเพิ่มความแข็งแรงของเซรามิกชนิดนี้ ค่าความแข็งแรงแรงดัด 160-180 เมกะปาสคาล เช่น ไอพีเอส เอ็มเพรส (IPS Empress) ของบริษัทไอโวลดา วิวาเดนท์ ประเทศลิกเตนสไตน์ เป็นต้น

2.3 กลาสเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกต เซรามิกชนิดนี้มีผลึกเป็น ลิเทียมไดซิลิเกต มีสูตรดังนี้ $Li_2Si_2O_5$ ซึ่งมีร้อยละ 60 และค่า ดัชนีการหักเหของแสงยังมีค่าใกล้เคียงกับของกลาสเมทริกซ์ ทำให้ค่าโปร่งแสงไม่ต่ำลงและยังมีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทิศทางการร้าวด้วย ค่าความแข็งแรงแรงดัด 350-450 เมกะปาสคาล เช่น ไอพีเอส เอ็มเพรสทู ไอพีเอส อีแมค เพรส ของไอโวลดา วิวาเดนท์ ประเทศลิกเตนสไตน์ เป็นต้น

2.4 กลาสเซรามิกชนิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ เซรามิกชนิดนี้มีผลึกเป็น ออกซีอะพาไทต์ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้น ออกซีอะพาไทต์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งมีสูตรดังนี้ $Ca_{10}(PO_4)_6OH_2$ ค่าดัชนีการหักเหของแสงยังมีค่าใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ เช่น ซีราเพิร์ล (Ceraparl) ของบริษัทเคียวเซรา รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.5 กลาสเซรามิกชนิดฟลูออราพาไทต์ เซรามิกชนิดนี้มีผลึกเป็นฟลูออราพาไทต์ ทำให้มีความโปร่งแสง ความสว่างและการกระเจิงแสง ใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับอนุสิทธิบัตรใกล้เคียงกับโครงเซรามิก เช่น ไอพีเอส อีริส (IPS Eris) ของบริษัทไอโวลดา วิวาเดนท์ ประเทศลิกเตนสไตน์ เป็นต้น

2.6 กลาสเซรามิกชนิดลิเทียมเซอร์โคเนียมซิลิเกต มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับอนุสิทธิบัตรใกล้เคียงกับเซอร์โคเนีย เช่น ไอพีเอส เอ็มเพรส คอสโมของบริษัทไอโวลดา วิวาเดนท์ ประเทศลิกเตนสไตน์ เป็นต้น มักใช้เป็นส่วนแกนบนแท่งเซอร์โคเนีย (zirconia post) แต่ความแข็งแรงก็ไม่เพียงพอในการใช้งานที่รับแรงบิดเคี้ยวที่มาก จึงมีการพัฒนาโดยการนำออกไซด์โลหะมาใช้ต่อไป

3. เซรามิกชนิดออกไซด์เซรามิก โดยเซรามิกประเภทนี้มีความแข็งแรงมาก แต่มีความทึบแสง เซรามิกชนิดนี้มีออกไซด์โลหะปริมาณมากและมีส่วนประกอบของซิลิกาจำนวนน้อย แบ่งออกเป็น สองประเภทตามปริมาณของอลูมินา

3.1 เซรามิกที่มีอลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก เซรามิกชนิดนี้มีความแข็งแรงมากทำให้หยุดการเกิดรอยร้าวได้

3.1.1 เซรามิกเสริมความแข็งแรงด้วยอลูมินา เซรามิกชนิดนี้มีปริมาณอลูมินา ร้อยละ 40.0-50.0 โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงแต่ความโปร่งแสงของเซรามิกลดลงมาก เช่น ไฮซีแรม (Hi-Ceram) ของบริษัท วีต้า ประเทศเยอรมัน มีค่าความแข็งแรงแรงดัด 125-155 เมกะปาสคาล

3.1.2 โครงเซรามิกแทรกด้วยแก้ว เนื่องจากไม่สามารถเพิ่มปริมาณ อลูมินาที่มีเกินกว่าร้อยละ 40.0-50.0 ในน้ำหนักได้ในกระบวนการแรก จึงมีขั้นตอนใช้แก้วชนิดแลนทานัม โดยการเผาพร้อมกันกับชิ้นเซรามิก ทำให้มีการแทรกเข้าไปด้วยแก้วในโครงเซรามิก โดยเซรามิกชนิดนี้มีปริมาณอลูมินา ร้อยละ 85.0 แต่มีความทึบแสง ค่าความแข็งแรงแรงดัด 500 เมกะปาสคาล เพื่อที่จะทำการปรับปรุงความทึบแสงจึงมีการเติมออกไซด์ของแมกนีเซียมลงไปผสมกับออกไซด์ของอลูมินา ทำให้ได้ผลึกที่เรียกว่า สปิเนล เช่น อินซีแรมสปิเนล มีค่าความแข็งแรงแรงดัด 400 เมกะปาสคาล แต่ในกรณีที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น มีการเติมเทตระโกนอล เซอร์โคเนีย ลงไป ร้อยละ 30.0 โดยน้ำหนัก ทำให้มีค่าความแข็งแรงแรงดัด 600 เมกะปาสคาล เช่น อินซีแรม เซอร์โคเนีย

3.1.3 โครงเซรามิกอลูมินาล้วน เซรามิกชนิดนี้มีปริมาณอลูมินา สูงถึงร้อยละ 99.5 ค่าความแข็งแรงแรงดัด 600 เมกะปาสคาล เช่น โพรเซรา ออลซีแรม (ProCera AllCeram) ของบริษัทโนเบล ไบโอแคร์ ประเทศสวีเดน

3.2 เซรามิกชนิดที่มีเซอร์โคเนียเป็นส่วนประกอบหลัก เซรามิกชนิดนี้มีความแข็งแรงมาก เนื่องจากองค์ประกอบหลักคือ เซอร์โคเนีย เป็นเซรามิกชนิดที่เราใช้ในการวิจัยนี้ โดยมีกระบวนการในการเพิ่มความแข็งแรงที่เรียกว่า ทรานฟอร์เมชัน ทัพเพนนิ่ง (Transformation toughening) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิที่สูงอยู่ในช่วง 1170 องศาเซลเซียส ถึง 2370 องศาเซลเซียส รูปร่างผลึกของเซอร์โคเนียจะอยู่ในรูปร่างเทตระโกนอล และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1170 องศาเซลเซียส ผลึกจะเปลี่ยนรูปร่างมาเป็น โมโนคลินิก (ขนาดโตขึ้นร้อยละ 4.4) โดยการทำให้ผลึกเทตระโกนอลเสถียรที่อุณหภูมิห้องโดยการเตรียมสารดังต่อไปนี้ลงไป อิตเทรียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์หรือแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นออกไซด์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

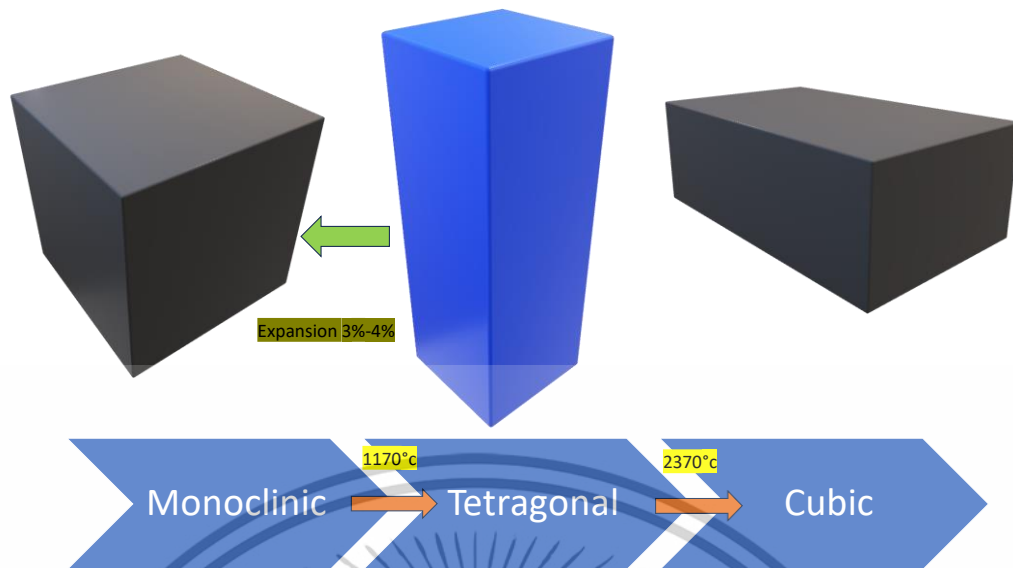
ทนไฟ เมื่อในสภาวะที่มีการแตกร้าวเกิดขึ้น พลังงานความร้อนที่จากรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนจากผลึกเทอร์โกนอลมาเป็นผลึกโมโนคลินิกที่มีความเสถียรกว่า ทำให้รอยร้าวถูกเบียดให้เล็กลงและไม่ทำให้เกิดการขยายออกของรอยร้าวขึ้น ซึ่งทำให้มี ค่าความต้านทานการแตกหักที่สูง เซรามิกชนิดนี้มีความแข็งแรงมาก ค่าความแข็งแรงดัดของเซรามิกชนิดนี้มีค่าใกล้เคียงกับของเหล็ก จึงเรียกว่า เซรามิกสตีล อยู่ที่ 700-900 เมกะปาสคาล เช่น เซอร์คอน (Cercon) ของบริษัทเดนทิสพาย ซีราโม ประเทศสิงคโปร์, ไอพีเอส อีแมค เซอร์แคด (IPS e.max ZirCAD) ของบริษัทไอโวลลา วิวาเดนท ประเทศลิกเตนสไตน์, ลาวา (Lava) ของบริษัท สามเอ็ม อีเอสพีอี ประเทศเยอรมันนี

โดยการทำให้ระบบแคด/แคม ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงที่ลดลงของวัสดุเซรามิกเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยที่สำคัญคือ ความเสียหายบกพร่องหรือความผิดปกติภายในโครงสร้าง เช่น รอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นจากการขัดแต่งผิว, รูพรุนหรือสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ภายในชิ้นงาน, และขนาดของโครงสร้างภายในที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุเซรามิก ค่าความเหนียวของวัสดุเซรามิกนั้นต่ำเนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของเซรามิกเป็นพันธะไอออนและพันธะโคเวเลนต์ ในการทดสอบ ความต้านทานการแตกหักแบบเปราะกับวัสดุเซรามิกเพื่อหาค่าเค ไอซี โดยทำการทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด (four-point bend) เมื่อมีรอยร้าวข้างเดียวรับแรงดึง (single-edge หรือ chevron-notched) บนชิ้นทดสอบ

โครงสร้างของครอบฟันชนิดโมโนลิธ [41]

เซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) เป็นโครงสร้างพหุสัณฐาน (polymorphic) (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ) เซอร์โคเนียอาจมีรูปผลึก (crystallographic) ได้สามรูปแบบที่ความดันบรรยากาศ ภายใต้สภาวะปกติ เซอร์โคเนียบริสุทธิ์จะเป็นโมโนคลินิกและเมื่อที่อุณหภูมิ 1170 องศาเซลเซียส สารจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกเตตระโกนัล จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ ที่อุณหภูมิ 2370 องศาเซลเซียส รูปที่ 4 และสุดท้ายกลายเป็นโครงสร้างฟลูออไรต์เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 2370 องศาเซลเซียสและจะหลอมละลายที่อุณหภูมิ 2716 องศาเซลเซียส ในระหว่างการใช้อุณหภูมิต่ำสลับสูง (Heating cooling cycle) เซรามิกเซอร์โคเนียออกไซด์จะผ่านการเปลี่ยนแปลงจากฮิสทีรีติก (hysteretic) และมาร์เทนซิติก (martensitic) โครงสร้างผลึกเตตระโกนัล เป็นโมโนคลินิก ซึ่งสามารถเปลี่ยนกลับได้เมื่อเย็นตัวลงที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส สำหรับการใช้งานทางทันตกรรม มีวัสดุเซอร์โคเนียไดออกไซด์ (เซอร์โคเนีย) หลายประเภทให้เลือกใช้งาน วัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างคริสตัล กระบวนการผลิต และการแปรผันที่สำคัญในคุณสมบัติทางกลและทางแสง มีการพัฒนาวัสดุเซอร์โคเนียมากมายหลายรุ่น ตั้งแต่การใช้ผลึกเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบเสริมแรงในเซอร์โคเนียอลูมินาแกร่ง ไปจนถึงเซอร์โคเนียเสถียรบางส่วนและเซอร์โคเนียชนิดดั้งเดิม ไปจนถึงรูปลักษณะของวัสดุเซอร์โคเนียโปร่งแสงชนิดใหม่ เช่น เซอร์โคเนียแบบลูกบาศก์ ตามรูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4 เฟสทรานฟอร์มเมชันของ เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2)

เซอร์โคเนียม (Zr) เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ชื่อ แซททาร์ (Zr) มาจากชื่อของแร่เซอร์คอน และชื่อเซอร์คอน มาจากคำภาษาเปอร์เซีย “ซาร์-กุน (Zar-Gun)” ซึ่งแปลว่า “สีทอง” เซอร์คอน เป็นโลหะทรานซิชันที่มีมวลอะตอม 91.224 กรัม/โมล และเลขอะตอม 40 จุดหลอมเหลวของ เซอร์โคเนียมอยู่ที่ 1855 องศาเซลเซียส ในขณะที่จุดเดือดคือ 4371 องศาเซลเซียส ธาตุเซอร์โคเนียม ถูกค้นพบในปีค.ศ. 1789 โดยมาร์ติน ไฮน์ริช คล็พโรท นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน และถูกแยกออก ในปีค.ศ. 1824 โดยนักเคมีชาวสวีเดน เย็นส์ ยาคอบ [42] โดย เฮลเมอร์และดริสคิลได้รายงานการใช้ เซอร์โคเนียมทางการแพทย์ครั้งแรกในปีค.ศ. 1969 อย่างไรก็ตาม คริสเทิล ในปีค.ศ.1988 เป็นคนแรกที่ใช้ เซอร์โคเนียมเพื่อสร้างหัวบอลสำหรับการเปลี่ยนข้อสะโพกสมบูรณ์ (complete hip replacement) [43]

เซอร์โคเนียมไม่เคยพบในธรรมชาติว่าเป็นธาตุเดี่ยว เช่นเดียวกับโลหะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แต่มันเกิดขึ้นตามธรรมชาติในหินอัคนีร่วมกับธาตุอื่นๆ เช่น เหล็ก ไทเทเนียม และซิลิคอนออกไซด์ แหล่งที่มาของเซอร์โคเนียมมากที่สุดคือเซอร์คอน มีสูตรดังนี้ $ZrSiO_4$ ซึ่งส่วนใหญ่พบในออสเตรเลีย แอฟริกาใต้ บราซิล อินเดีย รัสเซีย และสหรัฐอเมริกา แร่ธาตุอื่นๆ อีกหลายชนิดมีเซอร์โคเนียมรวมถึง แร่แบดเดเลย์ไอดต์ด้วย แม้ว่าเซอร์โคเนียมจะถูกใช้ครั้งแรกในศตวรรษگردอกในปี พ.ศ. 2512 เพื่อทดแทนหัวสะโพก แต่ก็ไม่ได้ใช้ในทางทันตกรรมจนถึงทศวรรษที่ 1990 เซรามิกชนิดเซอร์โคเนีย เช่น เซอร์โคเนียเตตระโกนัล ซึ่งได้รับการทำให้เสถียรบางส่วนโดยอิตเทรียได้ถูกใช้ในทางทันตกรรมประจำวันได้อย่างประสบความสำเร็จ เพื่อสร้างระบบทันตกรรมประดิษฐ์ติดแน่นและระบบทันตกรรม แคนด/แคม โดยอาศัยคุณสมบัติทางชีวภาพ เชิงกลและทางกายภาพที่ยืดหยุ่น ในทางกลับกัน ความพยายามหลายอย่างได้รับการปรับปรุงมากมายในด้านองค์ประกอบและโครงสร้างจุลภาค เพื่อ

ปรับปรุงคุณสมบัติทางแสงโดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางกลลดลง [13, 44-46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

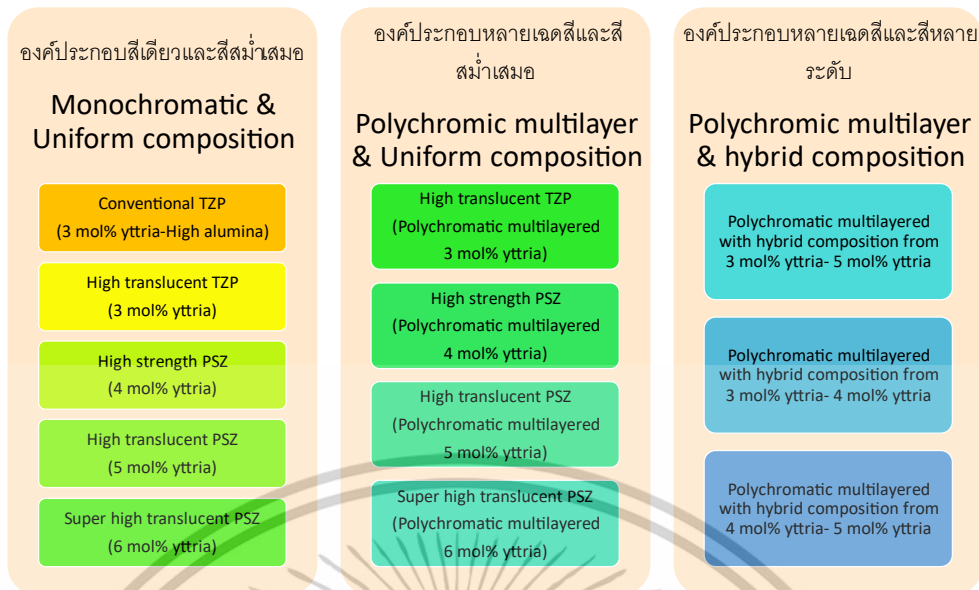
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซอร์โคเนียเป็นวัสดุโพลีคริสตัลที่ไม่สามารถแกะสลักได้ เนื่องจากไม่มีเฟสที่เป็นแก้วภายในโครงสร้าง ซึ่งสามารถยึดติดกับโครงสร้างฟันได้โดยใช้ทั้งซีเมนต์แบบดั้งเดิมและเรซิน อย่างไรก็ตามเรซินซีเมนต์เป็นที่นิยมเนื่องจากการปิดผนึกที่ดี การยึดติดที่ดีขึ้น และความต้านทานการแตกหักของเซรามิกที่ดีขึ้น

เซอร์โคเนียรุ่นใหม่หรือที่เรียกว่า โมโนลิติกเซอร์โคเนียเพิ่งถูกนำมาใช้ ผู้ผลิตระบุว่า การบูรณะด้วย โมโนลิติกเซอร์โคเนียมีความโปร่งแสงสูงกว่าเซอร์โคเนียทั่วไป ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีชั้นเคลือบฟัน การบูรณะด้วย โมโนลิติกเซอร์โคเนียอาจมีข้อดีทางคลินิกหลายประการ การไม่ใช้วีเนียร์ ปริมาณฟันที่สูญเสียและความเสี่ยงของการบิ่นของวัสดุจะลดลง รวมถึงความแข็งแรงที่แท้จริงของการบูรณะจะเพิ่มขึ้น [16]

การจำแนกประเภทของเซอร์โคเนีย [13]

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา เซอร์โคเนียทางทันตกรรมมีความหลากหลายมากขึ้น เป็นสิ่งที่ท้าทายในการเลือกประเภทของเซอร์โคเนียที่เหมาะสมสำหรับการบูรณะแต่ละครั้ง ด้วยการใช้เทคโนโลยีแคด/แคม ทำให้ปัจจุบันสามารถสร้างชิ้นงานที่ใช้ในการบูรณะฟันที่แม่นยำอย่างยิ่งอันเนื่องมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีดิจิทัล การบูรณะแบบไร้โลหะยังน่าสนใจด้วยเหตุผลทางชีวภาพและความงามอีกด้วย สำหรับการใช้งานทางทันตกรรม มีวัสดุเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (เซอร์โคเนีย) หลายประเภทเป็นสิ่งที่ถูกเลือก วัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างคริสตัล กระบวนการผลิต และการปรับเปลี่ยนที่สำคัญในคุณสมบัติทางกลและทางแสง วัสดุเซอร์โคเนียหลายรุ่นที่ได้รับการพัฒนาตั้งแต่การใช้ผลึกเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบเสริมแรงในเซอร์โคเนียอลูมินาแกร่งไปจนถึงเซอร์โคเนียเสถียรบางส่วนและแบบดั้งเดิมไปจนถึงรูปลักษณะของวัสดุเซอร์โคเนียโปร่งแสงใหม่ เช่น เซอร์โคเนียที่มีความเสถียรแบบลูกบาศก์ รูปที่ 5 แสดงการจำแนกประเภทของเซอร์โคเนียที่ทำให้เกิด อิตเทรียเสถียรเซอร์โคเนียล่าสุด



รูปที่5 แผนผังโครงสร้างและการจำแนกประเภทของเซอร์โคเนียทางทันตกรรมที่มี
อิตเทรียมเสถียรเซอร์โคเนีย

โครงสร้างจุลภาคของเซอร์โคเนีย [47, 48]

เฟสโมนอกลิติกของเซอร์โคเนียบริสุทธิ์ มีความเสถียรที่อุณหภูมิแวดล้อม ในขณะที่ระบบเฟสเททระโกนอลและรูปลูกบาศก์ จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ เมื่อเซอร์โคเนียละลายอย่างแน่นหนาในอิตเทรียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซีเรียม หรือไอออนอื่นๆ ที่มีรัศมีไอออนิกใหญ่กว่าเซอร์โคเนีย และแบ่งตามลำดับดังนี้:

2.1.1 เซอร์โคเนียเสถียรบางส่วน (Partially stabilized zirconia; PSZ)

ระบบเฟสเททระโกนอล และเฟสรูปลูกบาศก์ จะเสถียรที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเซอร์โคเนียละลายอย่างแน่นหนาในอิตเทรียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซีเรียมหรือไอออนอื่นๆที่มีรัศมีไอออนิกมากกว่าเซอร์โคเนีย เซอร์โคเนียที่มีความเสถียรแบบลูกบาศก์ (Cubic-stabilized zirconia; CSZ) คือ เซอร์โคเนียแบบเฟสรูปลูกบาศก์ ซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้องเมื่อมีการใส่อิตเทรียม ในปริมาณที่มากกว่า 8 เปอร์เซ็นต์โมล เฟสเททระโกนอล และเฟสรูปลูกบาศก์ ถูกผสมกันที่อุณหภูมิห้องเมื่ออิตเทรียม อยู่ที่ 3 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์โมล และวัสดุนี้เรียกว่าเซอร์โคเนียเสถียรบางส่วน (Partially stabilized zirconia; PSZ) เททระโกนอลเซอร์โคเนียโพลีคริสตอล (Tetragonal zirconia polycrystal, TZP) หรือที่รู้จักกันในชื่อ เซอร์โคเนียแกร่ง (Toughened zirconia) คือเซอร์โคเนียที่มีความหนาแน่นของเททระโกนอล เกือบร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่ออิตเทรียมมีประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โมลและ 3 เปอร์เซ็นต์โมลของ เททระโกนอลเซอร์โคเนียโพลีคริสตอลนี้เป็นหนึ่งในเซอร์โคเนียแรกสุดที่ใช้เป็น "โลหะสีขาว" ในทางทันตกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 เซอร์โคเนียเสถียรเต็มที่ (Fully stabilized zirconia; FSZ)

เซอร์โคเนียชนิดรูปลูกบาศก์ ที่มีอัตราส่วนผสมออกไซด์ (Y_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 8 ดังนั้นคำว่า เซอร์โคเนียเสถียรเต็มที่ แสดงผลึกเทระโกนอล และรูปลูกบาศก์บนโครงสร้างจุลภาค เมื่อเข้าห้อม แร่ดินเซอร์โคเนียผลึกรูปลูกบาศก์ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของผลึกรูปลูกบาศก์ที่มีมากขึ้น มีการยึดเกาะแน่นน้อยกว่า และส่งผลให้มีการกระเจิงของแสงที่ขอบเกรนเพิ่มขึ้นเนื่องจากความพรุนที่หลงเหลือลดลง นอกจากนี้ แสงตกกระทบยังถูกปล่อยออกมาอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นในทุกทิศทางเชิงพื้นที่ เนื่องจากโครงสร้างผลึกลูกบาศก์มีไอโซทรอปิกมากกว่าโครงสร้างเทระโกนอล เพื่อเพิ่มความโปร่งแสงของเซอร์โคเนียทางทันตกรรม ผู้ผลิตหลายรายเพิ่งเริ่มผลิตเซอร์โคเนียในรูปแบบลูกบาศก์เสถียรเต็มรูปแบบ (เนื่องจากมีเฟสลูกบาศก์เพิ่มขึ้น)

รุ่นต่างๆของเซอร์โคเนีย (Zirconia generations) [49, 50]

1. รุ่นแรก (The First generation)

เป็น 3 เพอร์เซ็นต์โมลของอิตเทรีย (3Y-TZPs) มีความแข็งแรงแรงดัดมากกว่า 1 จิกะปาสคาล และมีประกอบด้วยอลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการซินเตอร์ (sintering) อย่างไรก็ตามเซอร์โคเนียนี้แสดงความทึบแสงมาก เนื่องมาจากการหักเหของแสง สองทาง โดยธรรมชาติของเฟสเซอร์โคเนียที่ไม่ใช่ลูกบาศก์ เนื่องจากแสงกระจัดกระจายไปตามขอบเขตของเกรน รูพรุน และสิ่งเพิ่มเติม พวกมันถูกใช้เป็นหลักเป็นกรอบวัสดุในทางทันตกรรมติดแน่นของทั้งฟันหลังและทั้งฟันหน้า (Fixed Dental Prostheses) และครอบฟันเคลือบด้วยพอร์ซเลน

2. รุ่นที่สอง (The second generation)

ปริมาณอลูมินาของ 3 เพอร์เซ็นต์โมลของอิตเทรีย (3Y-TZP) ที่ใช้ในงานทันตกรรมจะลดลงจากร้อยละ 0.25 ถึง 0.05 โดยน้ำหนัก เซอร์โคเนียชนิด 3 เพอร์เซ็นต์โมลของอิตเทรีย ที่มีอลูมินาร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก มีความโปร่งแสงมากกว่า เซอร์โคเนียชนิด 3 เพอร์เซ็นต์โมลของอิตเทรียที่มีอลูมินา ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก แต่เนื่องจากมีอลูมินาน้อยกว่าที่จะทำให้ ผลึกเฟสเทระโกนอลเสถียร จึงมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสลายที่อุณหภูมิต่ำมากกว่า ความสับสนบางอย่างในระบบการตั้งชื่อเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งเซอร์โคเนียชนิด 3 เพอร์เซ็นต์โมลของอิตเทรียที่ประกอบด้วยอลูมินาร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก และ เซอร์โคเนียชนิด 5 เพอร์เซ็นต์โมลของอิตเทรีย (5Y-ZP) ถูกเรียกว่า “เซอร์โคเนียโปร่งแสง” (translucent zirconia) อย่างไรก็ตาม วัสดุเซอร์โคเนียเหล่านี้มีคุณสมบัติทางกลและทางแสงที่แตกต่างกัน

3. รุ่นที่สาม (The third generation)

เป็นเซอร์โคเนีย 5 เพอร์เซ็นต์โมลของอิตเทรีย ซึ่งทำให้เกิดเซอร์โคเนียที่มีความเสถียรบางส่วนโดยมีเซอร์โคเนียประมาณร้อยละ 50 เฟสรูปลูกบาศก์ เซอร์โคเนียเฟสรูปลูกบาศก์ เป็นแบบไอโซทรอปิกในหลายทิศทางของการเรียงตัวของอะตอมในผลึก ซึ่งช่วยลดปริมาณการกระเจิงของแสงที่ขอบเขตเกรน เซอร์โคเนียผลึกรูปลูกบาศก์ จึงดูโปร่งใสมากขึ้น เนื่องจากผลึกเซอร์โคเนียแบบรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกบาศก์ ที่คงตัวจะไม่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้องและมันจะไม่สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำหรือผ่านกระบวนการทรานสฟอร์มเมชันที่ฟเฟนนิ่ง

เซอร์โคเนียแบ่งตามความเข้มข้น เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย

1.3 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (3Y-PSZ)

คุณสมบัติทางกลและทางแสงของเซอร์โคเนียขึ้นอยู่กับปริมาณ เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย ในบรรดาเซอร์โคเนียหลายรูปแบบทั้งหมด 3 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย มีความทึบสูงสุด ความแข็งแรงแรงดัด และ ความต้านทานการแตกหักสูงสุด ค่าสีและค่าความทึบที่สูงของวัสดุจำกัดการใช้เพื่อสำหรับการบูรณะฟันหลัง

2.4 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (4Y-PSZ)

เซอร์โคเนียชนิด 4 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย มีคุณสมบัติโปร่งแสง และคุณสมบัติเชิงกลที่อยู่ระหว่างเซอร์โคเนียชนิด 3 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย และเซอร์โคเนียชนิด 5 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย ทำให้วัสดุประเภทนี้มีความน่าสนใจสำหรับในด้านความสวยงาม

3.5 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (5Y-PSZ)

เซอร์โคเนียชนิด 5 เพอร์เซนต์โมลของอิตเทรีย-สเตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย ได้เพิ่มความโปร่งแสง แต่ลดคุณสมบัติเชิงกลลง

เซรามิกเซอร์โคเนียสำหรับงานทันตกรรม [46]

รูปแบบเซอร์โคเนียที่ใช้กันทั่วไปในทางทันตกรรมในปัจจุบัน มีสามรูปแบบ ดังนี้:

1. เทตระโกนอลเซอร์โคเนียพอลิคริสตอลเจือด้วยอิตเทรียมไอออนบวก (3Y-TZP)

เซอร์โคเนียแบบดั้งเดิม ชนิดเทตระโกนอลเซอร์โคเนียพอลิคริสตอลเจือด้วยอิตเทรียมไอออนบวกเป็นวัสดุเซอร์โคเนียที่ใช้กันมากที่สุดในการบูรณะฟันแบบสองชั้น เพื่อทดแทนโครงสร้างเสริมที่เป็นโลหะ เทตระโกนอลเซอร์โคเนียพอลิคริสตอลเจือด้วยอิตเทรียมไอออนบวก ในปัจจุบันเป็นวัสดุเซอร์โคเนียที่ทนทานที่สุดในทางทันตกรรม

โครงสร้างจุลภาคของเซอร์โคเนีย (Zirconia microstructure)

เซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) เป็นโครงสร้างพหุสัณฐาน (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ) เซอร์โคเนียอาจมีรูปแบบผลึกได้สามรูปแบบภายใต้ความดันบรรยากาศ ในสภาวะปกติเซอร์โคเนียบริสุทธิ์จะเป็นโมโนคลินิกและเมื่ออุณหภูมิ 1170 องศาเซลเซียส สารจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกเทตระโกนอล จากนั้นเป็นโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ที่อุณหภูมิ 2370 องศาเซลเซียสและสุดท้ายกลายเป็นโครงสร้างฟลูออไรต์เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 2370 องศาเซลเซียส และหลอมละลายที่ 2716 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอบการใช้ที่อุณหภูมิต่ำสลับสูง เซอร์โคเนียออกไซด์จะผ่านการเปลี่ยนแปลงฮิสเทอริติก มาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทนไซด์ เททระโกนอล-โมโนคลินิก ซึ่งสามารถเปลี่ยนกลับได้ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เมื่อทำลดอุณหภูมิ รูปที่ 4 แสดงเฟสผลึกของเซอร์โคเนียและและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอีพิโทริซิส

เฟสโมโนคลินิก เป็นปริซึมที่มีรูปทรงผิวด้านขนานกัน ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลต่ำกว่าและอาจนำไปสู่การลดลงของการยึดกัน (cohesion) ของอนุภาคเซรามิก

เฟสเททระโกนอล เป็นปริซึมทรงตรงที่มีด้านเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น การตกตะกอนของเฟสเททระโกนอล ที่กระจายอยู่ภายใน เมทริกซ์ลูกบาศก์ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเฟสโมโนคลินิก ได้เมื่อความดันของเมทริกซ์เกิดขึ้น เมื่อมีการขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) ที่เกิดขึ้นในเมทริกซ์

เฟสรูปลูกบาศก์ มีรูปร่างเป็นปริซึมทรงเหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดเกรนใหญ่ ซึ่งช่วยลดการกระเจิงของแสงและการหักเหของแสงที่ขอบเกรน เฟสรูปลูกบาศก์ของเซอร์โคเนียเป็นแบบไอโซทรอปิก ในทิศทางของผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งช่วยลดการกระเจิงของแสงที่ขอบเขตของเกรน ผลก็คือเซอร์โคเนียผลึกรูปลูกบาศก์มีความโปร่งใสมากขึ้น ในอุณหภูมิห้อง เซอร์โคเนียผลึกรูปลูกบาศก์ ที่คงตัวจะไม่เปลี่ยนรูป ดังนั้นจึงจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดกระบวนการทรานสฟอร์มเมชันที่เฟนนิ่งหรือเกิดการสลายเมื่ออุณหภูมิต่ำลง กล่าวอีกนัยหนึ่งมันมีคุณสมบัติทางกลลดลงแต่จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป

การใช้งานเซอร์โคเนียควรพิจารณาถึงตำแหน่งของการใส่ฟันในคนไข้ในคลินิกทันตกรรม เนื่องจากการปรับปรุงเทคโนโลยีแคด/แคมและคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นของวัสดุ การศึกษาทางคลินิกที่มีอยู่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการอยู่รอดที่มีแนวโน้มเกี่ยวกับการบูรณะโดยใช้วัสดุรองรับฟัน ดังนั้น จึงควรเลือกเซอร์โคเนียที่เหมาะสม โดยขึ้นอยู่กับความต้องการความแข็งแรงหรือความสวยงามมากน้อยเพียงใด

2.3.2 การร้าวของเซรามิก (Cracked in dental ceramic material)

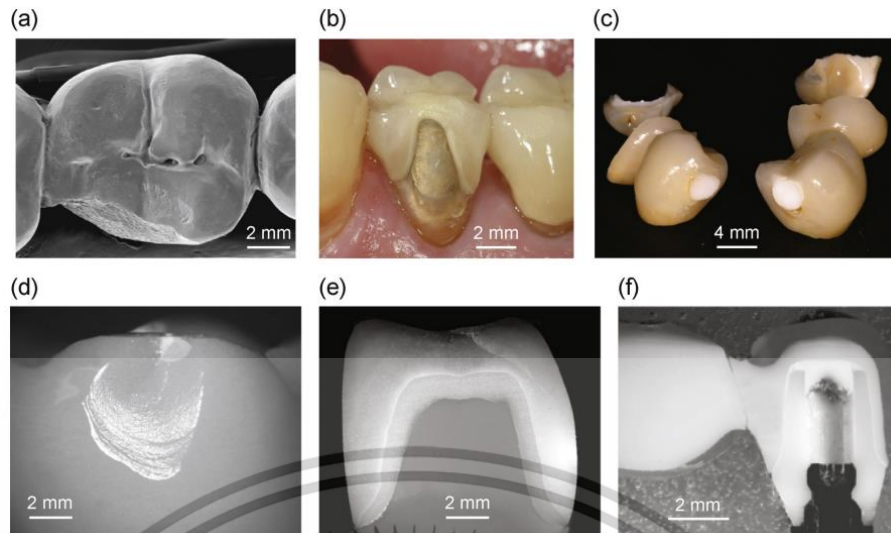
การบูรณะฟันที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการบูรณะด้วยการทำครอบฟันและฟันปลอมบางส่วนติดแน่น (FDPs) รวมถึงการทำวัสดุเทียมทางชีวกลศาสตร์อื่นๆซึ่งอุปกรณ์วัสดุต่างๆกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่การใช้วัสดุเซรามิกบางส่วน มีอุปสรรคทางด้านสำหรับความแข็งแรงและความเฉื่อยทางชีวภาพ แต่มีความเด่นในด้านความสวยงาม อย่างไรก็ตามเซรามิกนั้นมีความเปราะและง่ายต่อการแตกหักในการใช้งานซ้ำๆ [17, 51] แม้ว่าแรงบิดเคี้ยวที่มีแรงกดดันโครงสร้างที่รองรับโครงสร้างที่เป็นครอบฟันและฟันปลอมบางส่วนติดแน่น ความเค้นแรงดึงบางส่วนนั้นไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ รอยแตกมักจะไปตามเส้นทางที่มีความเครียดที่สุด ในขณะที่การบูรณะเซรามิกอาจจะมีการแตกหักกะทันหัน จากการได้รับแรงที่มากเกินไปเพียงครั้งเดียวและทำให้มีโอกาสเกิดความล้มเหลวสะสมเกิดมากขึ้น

การขับเคลื่อนไปสู่การบูรณะเป็นแบบเซรามิกเป็นอย่างมาก โดยทันตแพทย์มักมีความรู้สึกว่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครอบฟันเซรามิกและครอบฟันและฟันปลอมบางส่วนติดแน่นยังไม่น่าเชื่อถือเท่ากับที่มีครอบฟันโลหะแบบดั้งเดิม เซรามิกมีจุดเด่นในด้านความสวยงามมากที่สุด โดยเฉพาะ พอร์ซเลน มีแนวโน้มความต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำที่สุดเช่นกัน ในทางกลับกัน เซรามิกที่เหนียวกว่า เช่นที่มีส่วนประกอบของอลูมินาและเซอร์โคเนีย แต่มีความสวยงามไม่มาก กลาสเซรามิกอยู่ในระดับกลางโดยมีทั้งในแง่ทั้งความสวยงามและความแข็งแรง อย่างไรก็ตามวัสดุบูรณะชนิดวีเนียร์ (veneer) ยังคงมีจุดอ่อนและง่ายต่อการบิ่นและหลุดลอกออกจากแกน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนไม่ตรงกันระหว่างแผ่นวัสดุวีเนียร์และแกนกลางและการแพร่กระจายความร้อนที่ต่ำ ในเซรามิกส่วนใหญ่สามารถนำไปสู่แรงดึงความเครียดที่รุนแรงภายในทั้งสองชั้นได้ ระหว่างการอบชุบด้วยความร้อนอีกวิธีหนึ่งคือ การพัฒนาให้เซรามิกทนต่อการแตกร้าว แต่บางส่วนของเซรามิกชนิดโมโนลิติกที่โปร่งแสงเพื่อหลีกเลี่ยงความต้องการเคลือบทั้งหมดจึงมีการใส่สารบางส่วนลงไป เช่น กลาสเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกต เช่น ไอพีเอส อีแมค เพรส หรือ แคต ของบริษัท ไอโวลลา วิวาเดนท์ หรือเซอร์โคเนียที่เป็นเนื้อละเอียด เช่น ลาวา พลัส บริษัท สามเอ็ม อีเอสพีอี, บรุชเซียร์ บริษัท ไกด์เวลและ ออลเซอร์ บริษัท นิว อิมเมจ หรือ ฟันผิวแทรกด้วยแก้ว โมโนลิติกเซรามิกเพื่อหลีกเลี่ยงความอ่อนแอของตัวเชื่อมระหว่างวีเนียร์กับแกนลดความเสี่ยงของการแยกส่วน ในทั้งสองวิธี เซรามิกที่มีเซอร์โคเนียเป็นส่วนประกอบหลักจึงเป็นวัสดุทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง ด้วยความเปราะบางของเซรามิก จึงเป็นสิ่งที่ทำให้เห็นว่าความล้มเหลวของฟันเทียมที่จะเกิดขึ้นบางอย่างโดยทั่วไปนั้นจะพบการแตกหักทางคลินิกลักษณะดังนี้ ในรูปที่ 6 รวมถึงรอยร้าวที่เกิดจากบริเวณสัมผัสที่ด้านสบฟันจากพื้นผิวของซีเมนต์ภายใต้จุดเชื่อมต่อและจากระยะขอบของครอบฟันและข้อต่อเข้ากับครอบฟันและฟันปลอมบางส่วนติดแน่นตัวอย่างบางส่วนในทางคลินิกที่แตกหักแสดงในรูปที่ 6a-c เผยให้เห็นการแตกหักจากการสึกหรอบนพื้นผิวครอบฟันเซอร์โคเนียเคลือบพอร์ซเลน พบรอยแตกตามยาวเริ่มต้นจากขอบของครอบฟันเซรามิกชนิดผงกับน้ำแบบดั้งเดิมไดคอรอยแตกทั้งหมดนี้สามารถส่งผลให้เกิดความเสียหายรุนแรงหรือความล้มเหลวที่ไม่สามารถกู้คืนได้ การบิ่นแตกหักเริ่มต้นจากจุดสัมผัสที่เสียหายและแยกออกทีละส่วนของวีเนียร์ออกจากแกน การแตกหักเริ่มต้นจากด้านบดเคี้ยวหรือการยึดเกาะใต้หน้าสัมผัสหรือจากระยะขอบหรือตัวเชื่อมต่อและสามารถแยกฟันปลอมออกเป็นสองส่วน[51]

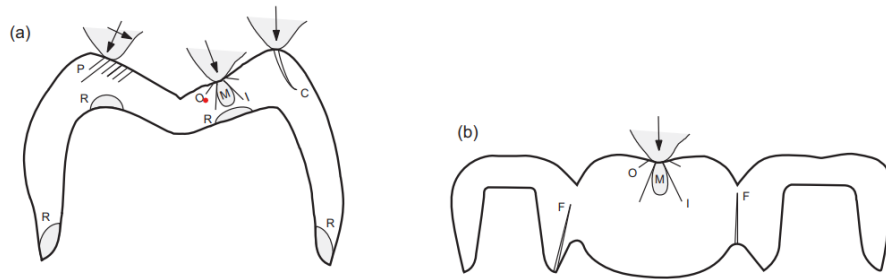
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 การทดสอบทางคลินิก รายงานลักษณะความเสียหายสำหรับเซรามิกหลายระบบ [51]

โดยรายงานอัตราการมีชีวิตรอดสำหรับระบบเซรามิกทั้งหมดหลายระบบบ่งบอกถึงความสำคัญสำหรับการแตกหักทั้งหมดเหล่านี้ กล่าวโดยกว้าง ระบบฟอร์ซเลนวีเนียร์ แสดงอัตราการแตกหักที่สูงกว่าครอบฟันทั้งซี่ชนิดโมโนลิติก ฟันปลอมบางส่วนติดแน่นมากกว่าครอบฟันเดี่ยว และกลาวเซรามิกมากกว่าโมโนลิติกเซอร์โคเนียแม้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลในการศึกษาวิจัยอาจจะสูง กลไกทางกายภาพของความเมื่อยล้าในวัสดุบูรณะเซรามิกไม่ได้มีการบันทึกไว้อย่างดีในการศึกษารรณกรรม มุมมองหลากหลายมาจากการศึกษาพื้นฐานในด้านวัสดุศาสตร์ ในความเห็น้อยล้าสามารถอธิบายได้โดยการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของรอยแตกขึ้นอยู่กับความชื้นตามทัศนะนี้เริ่มต้น โดยการมีน้ำเข้าสู่รอยแยกและหลายพันระอันเหนียวแน่นที่ยึดผนังรอยแตกไว้ลงรวมกับผลลัพธ์เรียกว่า การเติบโตของรอยร้าวอย่างช้า (slow crack growth, SCG) ซึ่งดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไปการเร่งในระดับความเครียดที่สูงขึ้นและนำไปสู่ความล้มเหลวในที่สุด ความคิดนี้น่าดึงดูดใจเพราะมันทำให้ตัววัสดุเองเกิดกลไกการแตก การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ในแง่ของสมการความเร็วของการแตกที่ชัดเจนทำให้สามารถทำนายอายุขัยในรูปของสภาวะความเครียด แต่การศึกษาล่าสุดในเวทีวัสดุศาสตร์ เผยความเห็น้อยล้าซับซ้อนกว่าแค่การเติบโตของรอยร้าวอย่างช้า นอกจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแล้ว ยังมีกลไกการเปลี่ยนแปลงทางกลที่ช่วยเพิ่มกระบวนการความล้าได้อีกด้วย ความล้าทางกลทำงานเฉพาะในการทดสอบโดยใช้แรงกระทำเป็นจังหวะ (cyclic loading) และไม่สามารถอนุมานได้จากการทดสอบโดยการให้แรงแบบคงที่หรือแบบเดียว หมายความว่า การคาดการณ์โดยการอิงจากสมมติฐานของการเติบโตของรอยร้าวอย่างช้าเท่านั้น อาจประเมินอายุขัยที่เป็นไปได้เกินความจริง การวิเคราะห์ผิวหน้าแตกหัก (Fractography) เป็นการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุบูรณะภายหลังจากการเกิดความล้มเหลว สามารถชี้ไปที่จุดเริ่มต้นของการแตกหัก แต่มีข้อจำกัดในความสามารถในการส่องแสงเข้าไป กลไกความล้าด้วยตัวเองหรือเพื่อกำหนดความก้าวหน้าเชิงวิวัฒนาการที่ซับซ้อนในบางครั้งของการแตกหักจนจบกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แผนผังแสดงการแตกหักในโหมดต่างๆทั้งในส่วนของตัวฟัน (a) และโครงสร้างเซรามิกทั้งหมดบนฟันปลอมบางส่วนติดแน่น (b) [51]

โดยการแตกหักโหมดต่างๆใน (a) ตัวฟัน และ (b) โครงสร้างเซรามิกทั้งหมดและฟันปลอมบางส่วนติดแน่น: รอยแตกรูปกรวยด้านนอก (O) และด้านใน (I) โคนแค้ริกและคามีเดียนแค้ริก (M), พาร์เซียลโคนแค้ริก (P) แค้ริก คือ เอช ซิบปิ้ง แค้ริก (cracks; edge chipping crack, C) รอยแตกในแนวรัศมี (Radial cracks, R) ที่พื้นผิวซีเมนต์ รอยแตกร้าวในตำแหน่งใกล้เคียงกับที่รองรับเกิดจากแรงดัดหรือน้ำหนักแนวตั้งกระทำร่วมกัน (flexure cracks, F) รอยแตกที่ตัวเชื่อมต่อและรอยแตกตามเส้นตรง (O, I, P, C, F) ขยายออกจากระนาบของไดอะแกรม, เงาของรอยแตก (shaded cracked (R, M)) ขยายภายในระนาบของไดอะแกรมตามรูปที่ 7 ที่ได้แสดงไว้

สิ่งสำคัญคือต้องเข้าใจการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโหมดการแตกหักเพื่อพัฒนาเซรามิกเพื่อการบูรณะที่ทนทานต่อการล่าได้ดีที่สุด ดังนั้นการสำรวจพฤติกรรมความเหนียวล้าของการใช้ทั่วไปของเซรามิกทางพันธุกรรมทางด้านชีวกลศาสตร์ กลไกหลักทางด้านเคมีและกลไกการเมื่อยล้าเกิดขึ้น การทดสอบการโหลดแรงสปันจำลองบนแบบจำลองแบบ (เช่นเดียวกับความถูกต้องทางลักษณะกายวิภาคของฟันเทียม) ออกแบบมาเพื่อแสดงถึงคุณสมบัติที่สำคัญของการบูรณะชั้นเซรามิกที่ยึดติดกับวัสดุ และทดสอบการแตกหักที่หลากหลายเพื่อทราบถึงวิธีในการยืดอายุการบูรณะด้วยเซรามิก

การประเมินความล้มเหลว (Failure evaluation)

โหมดการแตกหัก (Fracture modes)

ความล้มเหลวในการทำฟันเทียมเซรามิกมักเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องที่มีทางโครงสร้างโดยข้อบกพร่องอาจเกิดขึ้นในระหว่างการผลิตและการเตรียมครอบฟันหรือจากการเคี้ยวภายหลังจากการใส่ครอบฟันแล้วพวกเขาสามารถอยู่ในรูปแบบของข้อบกพร่องของโครงสร้างจุลภาคภายในเซรามิกจากการตึงเครียดในการผลิตหรือความเสียหายจากการพันทรายระหว่างการทำหรือจากด้านการสึกหรอและการสัมผัสความเสียหายบนพื้นผิวขัดเคียวหรือจากการทำการเชื่อมประสาน (cementation) บนพื้นผิว หรือจากการสัมผัสระดับจุลภาคกับวัตถุมีคมที่แข็งในเซรามิก ทำให้เกิดตำหนิโดยทั่วไปถือว่ามีอยู่ในรูปของรอยร้าวในระดับจุลภาค (micro cracks) ของระดับมาตราส่วนย่อยมิลลิเมตร ซึ่งมักจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำกว่าการตรวจจับด้วยสายตา ดังนั้นข้อบกพร่องดังกล่าวสามารถหาได้จากภายหลังจากการเกิด การวิเคราะห์ผิวหน้าการแตกส่วนใหญ่แล้วรอยแตกที่เกิดขึ้นใหม่จะถูกเก็บสะสมไว้ต่อมาก็เพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงเวลาในการทำการทดสอบโดยใช้แรงที่กระทำเป็นจังหวะ ก่อนที่จะเกิดความล้มเหลวในที่สุด ในพันธกรรมชาติ 'ความคงตัว' ของรอยแตกนี้ปรากฏเป็น ร่องลึกแบบปิด หรือ วงที่เรียงเป็นชั้นๆ (lamellae) ตามผนังเคลือบฟันเป็นไปได้ว่า การขยายของรอยแตกคงที่สามารถตรวจสอบได้โดยการตรวจสอบครอบฟันเป็นระยะๆ แต่สิ่งนี้อยู่เหนือขอบเขตของการปฏิบัติทางทันตกรรมปกติทั่วไป และไม่มีมีการรับประกันความเสียหายในกรณีใดๆ ซึ่งความเสียหายจะปรากฏให้เห็นที่พื้นผิวด้านนอกของวัสดุ นอกจากนี้ โหมดการแตกร้าวที่แตกต่างกันสามารถทราบได้ภายใต้เงื่อนไขทางเรขาคณิตบางอย่างและระยะต่างๆ ในการได้รับแรงดั่งนั้น วิวัฒนาการของการหักงอและยึดและการวิเคราะห์ภายหลังจากการแตกหักและการตรวจเพียงอย่างเดียว

สิ่งที่ขาดหายไปจากการศึกษาทางคลินิกคือพื้นฐานความเข้าใจโลกต่างๆ รวมถึงข้อบกพร่องต่างๆ การพัฒนาไปสู่การแตกหักแบบเต็มรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำการทดสอบโดยใช้แรงที่กระทำเป็นจังหวะ แนวทางหนึ่งคือทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการแก้ไขตัวอย่างทางกายวิภาคโดยใช้แรงกดลงโดยตรงที่พื้นผิวที่เปิดโล่งพร้อมแผ่นเยื้องหรือรูปทรงกลม ตัวอย่างฟันเทียมเซอร่าโคเนียเคลือบพอร์ซเลนที่แตกร้าว อยู่ในรูปที่ 6 สำหรับครอบฟันที่ใส่ในแนวตั้งที่ขอบฟันทางปุ่มฟันด้านแก้ม (Buccal cusp) (รูปที่ 6d) ที่ด้านหลังของปุ่มฟันด้านแก้ม ด้วยการเลื่อนไปทางแฉ่งกลาง (central fossa) (รูปที่ 6e) และสำหรับฟันบล็อมบางส่วนติดแน่น 3 ยูนิตที่ได้รับแรงที่ ปุ่มฟันด้านแก้มของฟันลอย (pontic) (รูปที่ 6f) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างที่ซับซ้อนดังกล่าวไม่สามารถแก้ไขได้เพื่อการวิเคราะห์และการทำนายอย่างง่ายจึงเหมาะสมในการทำการทดสอบชิ้นส่วนของมนุษย์ (ex vivo) กับชิ้นงานที่เปราะบางซึ่งคงไว้วัสดุที่จำเป็นและลักษณะทางเรขาคณิตของครอบฟัน แต่ในลักษณะที่เป็นอุดมคติที่ช่วยให้สามารถเฝ้าติดตามในแหล่งกำเนิดของรอยแตกที่ละส่วนหรือเกิดขึ้นพร้อมกันตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงความล้มเหลวทั้งหมด ในแนวทางนี้ การทดสอบจะดำเนินการกับเพลตแบบพื้นเรียบและโครงสร้างครอบฟันที่ยึดติดกับพอลิเมอร์ ตัวแทนพื้นผิวของเนื้อฟันที่เป็นไปตามข้อกำหนด

ข้อมูลความแข็งแรง (Strength data)

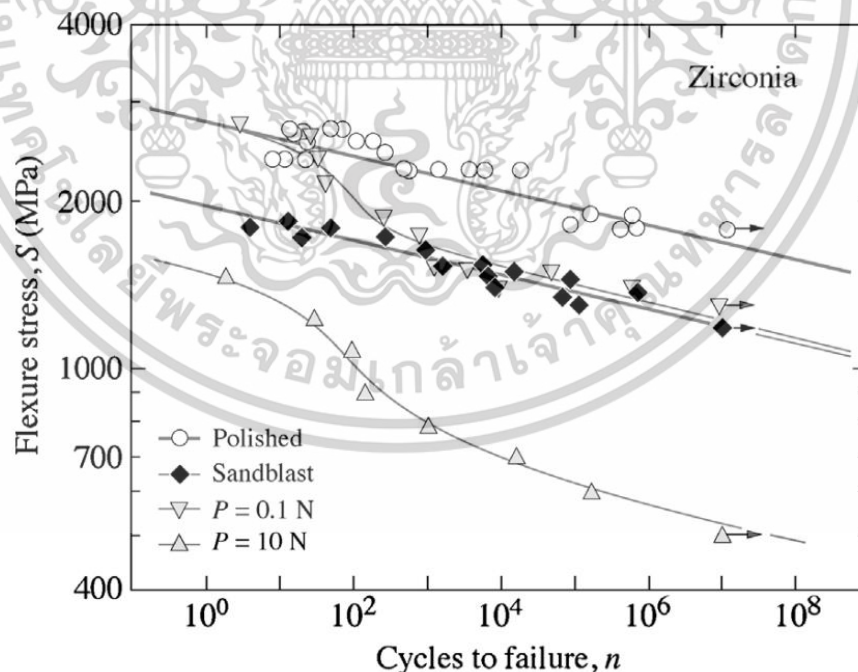
การประเมินความล้าของเซรามิกทางทันตกรรมดำเนินการโดยใช้วิธีการทดสอบแรงดัดมาตรฐาน วิธีที่พบบ่อยที่สุดคือการทำลายแถบแบนหรือดิสก์และประเมิน ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (S) เป็นฟังก์ชันของจำนวนรอบ ท่อตีของการทดสอบดังกล่าวคือความเรียบง่ายในการเตรียมตัวอย่างและการเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อสรุปหลายประการ จากรูปที่ 8: (i) พื้นผิวที่ขัดมัน ความแข็งแรงประมาณสองเท่าหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าในช่วงการทดสอบโดยใช้แรงที่กระทำเป็นจังหวะ (เทียบเท่า 5 ปีขึ้นไปหรือที่ความถี่การเคี้ยวอาหารปกติ) สอดคล้องกับความคาดหวังของการเติบโตของรอยร้าวอย่างช้า (ii) ระดับการพ่นทรายจะลดความแข็งแรงของเซอร์โคเนีย ในกรณีนี้ประมาณหนึ่งในสามเทียบกับพื้นผิวที่ขัดเงา ซึ่งบ่งบอกถึงการแนะนำของการเกิดรอยร้าวระดับจุลภาค จากการเสียดสีของอนุภาคและยังคงสอดคล้องกับการเติบโตของรอยร้าวอย่างช้า (iii) การตอกับอนุภาคที่แข็งทำให้ความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพทางกลทับซ้อน การเปรียบเทียบการทดสอบความแข็งแรงในการโหลดแบบเดียวอย่างต่อเนื่องมากกว่าระยะเวลาการทดสอบที่เทียบเท่า ไม่แสดงการเบี่ยงเบนดังกล่าวจากเชิงเส้น

แนวโน้มเหล่านี้แสดงถึงเซรามิกทันตกรรมทั้งหมด มันมีเพียงตำแหน่งแนวตั้งบนจุดที่แตกต่างกัน โดยปกติระดับความแข็งแรงสำหรับเซรามิกที่ใช้อลูมินาและ กลาสเซรามิกชนิดลิเทียมซิลิเกตมีประมาณครึ่งหนึ่งถึงหนึ่งในสามสำหรับเซอร์โคเนีย ในขณะที่ระดับพอร์เชลนอยู่ที่ประมาณขนาดต่ำกว่า โดยการแสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของเซรามิกเซอร์โคเนียที่ยึดกับฐานโพลีคาร์บอเนตในการรับแรงการโค้งงอ ขณะที่แรงที่กระทำเป็นจังหวะสู่ความล้มเหลวที่ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ ข้อมูลแสดงสำหรับพื้นผิวที่ขัด, ผิวที่พ่นทรายและผิวที่ได้รับน้ำหนักกระทำเป็นจุด เส้นแนวโน้มเชิงเส้นสอดคล้องกับการเสื่อมสภาพจากสารเคมีช่วยชะลอการเกิดการแตกในที่มีมีน้ำ การเบี่ยงเบนไปในทิศทางลงจากเส้นแนวโน้มเชิงเส้นบ่งชี้ว่ามีการเสื่อมสภาพทับซ้อนจากความล้าทางกล



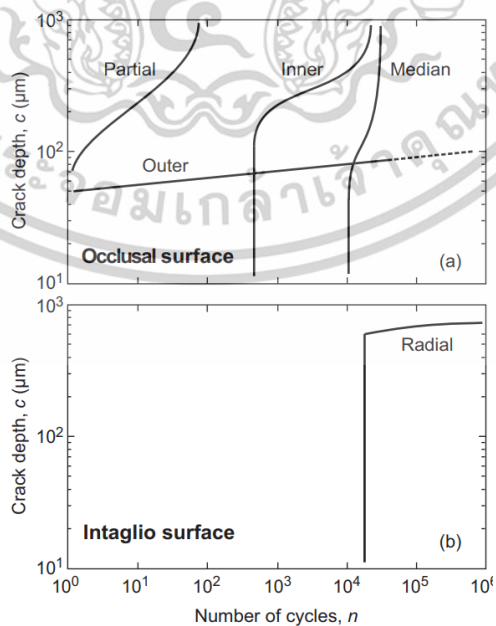
รูปที่ 8 ความแข็งแรงของเซรามิกเซอร์โคเนีย [51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลอายุการใช้งาน (Lifetime data)

การทดสอบความแข็งแรงจะบอกเพียงส่วนหนึ่งของเรื่องราวของความเหนื่อยล้า จุดเริ่มต้นของการแตกที่ความเค้นแรงดึงสูงสุดไม่ได้หมายถึง 'ความล้มเหลว' ของวัสดุทางคลินิกที่ซับซ้อน เนื่องจากแสดงให้เห็นในรูปที่ 7 และ 8 ในการพบรอยแตกที่เกิดขึ้นใหม่

เพื่อแสดงให้เห็น รูปที่ 9 แปลงความลึกของรอยแตกกับจำนวนรอบแผ่นกระจกแบนหนา 1 มิลลิเมตรยึดติดกับฐานพอลิเมอร์คล้ายเนื้อฟันที่หนาขึ้น (รูปที่ 9a) และให้แรงตามแนวแกนที่พื้นผิวด้านบนโดยทรงกลมแข็งที่ ความถี่ 1 เฮิรตซ์ พื้นผิวของแผ่นกระจกที่ถูกขัดด้วยกรวดผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์ (คล้ายกับข้อบกพร่องในพอร์ซเลน) เพื่อให้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการแตกหัก รูป 9a แสดงถึงพฤติกรรมของการขยายออกของรอยแตกที่ลงมาเริ่มต้นที่พื้นผิวด้านบน - รอยแตกของกรวยด้านนอกและด้านในและรอยแตกเฉลี่ยในการรับน้ำหนักตามแนวแกน กรวยบาง ส่วนในการให้แรงแบบเลื่อน รูปที่ 9b แสดงพฤติกรรมของรอยแตกที่มีการขยายขึ้นไปด้านบน เริ่มต้นที่พื้นผิวส่วนแนวตั้งของบางเส้น บอกถึงการเริ่มต้นอย่างกะทันหันในระยะหลังของการได้รับแรงต่อเนื่อง สำหรับการอ้างอิง เส้นสำหรับรอยแตกของกรวยด้านนอก รูปที่ 9a โดยแสดงถึงความลึกของรอยแตกผ่านส่วนของชั้นเทียบกับจำนวนรอบสำหรับแผ่นกลาสโมโนลิติกที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรยึดติดกับฐานโพลีคาร์บอเนตที่หนาขึ้นและบรรจุด้วยแรงในแนวแกน 120 นิวตัน ที่พื้นผิวด้านบนโดยมีรูปทรงกลมแข็งรัศมี 1.6 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ (รูปที่ 9a) โดย (a) แสดงถึงกรวยและรอยแตกตรงกลางเริ่มต้นที่พื้นผิวกระจกด้านบน และ (b) แสดงถึงรัศมีรอยแตก เริ่มต้นที่พื้นผิวกระจกด้านล่าง เส้นคาด คาดการเติบโตจากการเติบโตของรอยร้าวอย่างช้าๆเพียง รอยแตกเริ่มต้นที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตรในรอบแรก เส้นประแนวตั้งบ่งบอกถึงขั้นตอนการเริ่มต้นที่เกิดขึ้นทันที



รูปที่ 9 ความลึกของรอยแตกผ่านส่วนของชั้นเทียบกับจำนวนรอบสำหรับวัสดุ Monolith [51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขยายระหว่างจุดเริ่มรอยแตกกร้าวและการเจาะชั้นสุดท้าย หมายความว่าสามารถกักเก็บ รอยร้าวภายในที่เกิดขึ้นมาได้อย่างดี โครงสร้างภายในช่องปากจุดนั้นแสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกัน ระหว่างโหมตการแตกหักที่แตกต่างกัน โหมตที่ได้รับแรงเพียงรอบเดียวสามารถได้รับแรงที่สูงเกิน อย่างสมบูรณ์โดยใช้โหมตการแข่งขันหลังจากการให้แรงต่อไป ตำแหน่งสัมบูรณ์หรือสัมพัทธ์ของเส้น โค้งเหล่านี้สามารถเคลื่อนได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงกด ชนิดวัสดุ สถานะความเค้นภายในที่หลง เหลืออยู่ และความหนาของชั้นที่เกิดขึ้นจริง พื้นผิวโค้งของฟันปลอม การอยู่นิ่งของการหักภายหลังที่ เริ่มแตกหักจะเด่นชัดน้อยลงในซี่ฟันที่ขนาดเล็กลง จนในที่สุดความล้มเหลวอาจเกิดขึ้นได้เองและเกิด การเริ่มแตกใหม่ วิธีการทดสอบนั้นขยายไปถึงโครงสร้างสามชั้น ด้วยการกำหนดค่ารอยร้าว กำหนด โดยจุดตัดด้วยผิวหน้าที่อยู่ระหว่างผิวในของวีเนียร์และแกน รอยแตกของวีเนียร์อาจทำให้เกิดการแยก ตัวที่ส่วนต่อที่ผิวหน้าที่อยู่ระหว่างวัสดุสองส่วน ขณะที่รอยแตกของแกนกลางพื้นผิวด้านล่างมีแนวโน้ม ที่จะแตกเข้าไปในวีเนียร์มากขึ้นทันที ในบริบทของความล้มเหลวของฟันเทียม แทบจะไม่มีประวัติรอย แตกที่ซับซ้อนชัดเจน สามารถอนุมานได้ว่าการตรวจสอบภายในพื้นผิวด้านนอกหรือ การศึกษาใน ส่วนของมนุษย์ส่วนที่เหลือและไม่ได้มาจากการทดสอบรอบเดียวอย่างแน่นอน

การแตกหักกลศาสตร์และ การทำการทดสอบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาที่มาของ ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนสำหรับแรงกดที่สำคัญสำหรับการเจาะชั้นในแง่ของคุณสมบัติของวัสดุทางคลินิก ที่สำคัญไม่ดูลัสของความเหนียวและความแกร่ง) และ ข้อมูลจำเพาะด้านรูปทรงเรขาคณิต (ขอบเขตที่ สัมผัส, ความหนาของชั้น, ความโค้ง) การคาดการณ์อายุการใช้งานสำหรับการกำหนดค่าชั้นเซรามิกที่ เกี่ยวข้องทางคลินิกเป็นลักษณะรายละเอียดความเสียหาย เป็นจำนวนรอบของแรงกด ตัวอย่างแสดง ในรูปที่ 9a และ b สำหรับ พอร์ซเลนวีเนียร์ชนิดลิเทียมไดซิลิเกตและเซรามิกเซอร์โคเนียที่ยึดกับชั้น เนื้อฟัน (ที่ความหนาของพอร์ซเลน 1 มิลลิเมตร) สำหรับลิเทียมไดซิลิเกตและเซอร์โคเนียโมโนลิติกที่ จับคู่กันในแต่ละความหนาที่ 1.5 มิลลิเมตร และการรับน้ำหนักตามแนวแกนพร้อมพอร์ซเลนหรือพื้น ผิวนเคลือบฟันที่อยู่ตรงข้ามรัศมีที่ 5 มิลลิเมตร แผนภาพเชิงเส้นแทนรอยแตกกรวยบนด้านบดเคี้ยว และพื้นผิวและรอยร้าวใต้พื้นผิวซีเมนต์ทั้งหมดแสดงการลดลงอย่างต่อเนื่องของแรงกดที่ยั่งยืนกับการ เพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของการได้รับแรง

การได้รับแรงปกติตามแนวแกนฟันที่มีการสัมผัสค่อนข้างที่อ (blunt contact) โดยการให้ แรงด้วยรูปทรงกลมที่มีรัศมีเล็กกว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรอยแตกในแนวรัศมีอย่างมาก แต่สามารถ ทำให้เกิดการเริ่มต้นของไมโครพลาสติกซิตี้(microplasticity) ที่พื้นผิวด้านบนรุนแรงขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้น ของการแตกกร้าวและการสึกหรอแบบเร่ง การทับซ้อนของส่วนประกอบที่เคลื่อนไถล(sliding compo nent) สามารถทำให้เกิดรอยแตก ซึ่งแต่ละส่วนทำให้เกิดการล้มเหลวได้ภายใต้เงื่อนไขบางประการ ขอบบิ่น (edge chipping) จากการโหลดด้วยจุดคมใกล้กับผนังด้านข้างของครอบฟัน การที่ขอบแตก บิ่นในแรงกดที่สำคัญด้วยการได้รับแรงซ้ำๆ สำหรับเซรามิกทันตกรรม สำหรับโหมตการแตกหักตาม แนวแกน โดยเฉพาะในพอร์ซเลนพบว่าเกิดการบิ่นในวัสดุวีเนียร์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทางกลศาสตร์ของการแตกหักคือการประเมินคุณสมบัติความล้า (fatigue properties) ของเซรามิกที่มีความเข้าใจทางกายภาพที่ชัดเจนในมากมายของโหมดการแตกหัก ข้อมูลความแข็งแรงจากมาตรฐานการทดสอบแรงดึงแบบรอบเดียวบนชิ้นงานแบบแท่งหรือแบบจาน การทดสอบความแข็งแรงสามารถทำได้แตกต่างกันสถานะความเค้นแรงดึง (tensile stress) ประกอบด้วยส่วนผสมของการสัมผัสที่ซับซ้อน ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยร้าวที่เกิดขึ้น ระยะการหยุดและการคงที่ของการขยายการแตกร้าวในรูปที่ 9 การทำการศึกษากาวิเคราะห์ผิวหน้าแตกหัก มีประโยชน์ในการระบุที่มาของการแตกร้าวจากจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวไปจนถึงความล้มเหลวขั้นสุดท้ายตามหลักการแล้วการประเมินอายุของกรอบฟันการทดสอบตัวอย่างที่ถูกต้อง ตามหลักกายวิภาคภายใต้เงื่อนไขการทำงานของช่องปากจริง เช่น ในเครื่องจำลองการเคลื่อนไหวของช่องปาก แต่ข้อเสนอเหล่านี้ที่มี ทำให้เข้าใจถึงบทบาทของตัวแปรควบคุมความล้าหลายอย่าง

โดยทั่วไป โมนาไลติกที่มีเซอร์โคเนียเป็นส่วนประกอบหลักหรือ โครงสร้างวีเนียร์ มีการทนต่อการถูกทำลายมากกว่ากลาสเซรามิก และมีความเหนียวสูงกว่าวัสดุที่ยังไม่ได้รับการพัฒนา และโครงสร้างของวีเนียร์เป็นพอร์ซเลนที่บอบบางและมีการแตกของผิวหน้า การทำลายทางกล สามารถแสดงโดยการทดสอบการทดสอบแรงดึงและสำหรับความเสียหายจากการสัมผัสแบบจุดบนพื้นผิว การลดลงของความแข็งแรง เนื่องจากการทำลายจากแรงเสียดทานภายในและตามด้วยการเกิดรอยร้าวระดับจุลภาคที่พื้นผิวที่อ่อนแอที่ใกล้กับผิวของบริเวณที่ถูกทำลาย ดังนั้นการคิดออกแบบวัสดุต่อไปจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้ คุณสมบัติของวัสดุ, โครงสร้างระดับจุลภาค, ความเค้นตกค้าง, โครงสร้างของโมนาไลติกกับวีเนียร์, ความหนาของชั้น, สภาวะการยึดติดของฟัน, ขนาดและรูปร่างฟัน, การยึดติดของเนื้อฟันและเคลือบฟัน และสภาพพื้นผิว

2.4 วิธีการตรวจการแตกร้าวของวัสดุ การตรวจแบบไม่ทำลาย

การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing) [1] เป็นการตรวจสอบการเฝ้าระวังความเสียหายของวัสดุ โครงสร้างหรือสิ่งต่างๆที่สนใจทราบถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ก่อนและหลังการใช้งาน เพื่อป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต โดยระบบการตรวจสอบนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่า 20 ปี ซึ่งการทดสอบที่นิยมใช้ เป็นวิธีทดสอบอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission Testing) โดยวิธีการนั้นสามารถทำแบบเรียลไทม์และเป็นการตรวจสอบแบบเฝ้าระวัง (Health Monitoring) วิธีทดสอบอะคูสติกอิมิชชัน ใช้ในการตรวจรอยเสียหายทั้งในระดับจุลภาค (Micro structure) และระดับมหภาค (Macro structure) ที่กำลังเกิดหรือกำลังขยายตัวออก โดยรอยเสียหายจะเป็นตัวส่งสัญญาณเป็นลักษณะคลื่นเสียงออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการพื้นฐานการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง [52]

ในโหมดการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic inspection) ที่พบบ่อยที่สุด เป็นการปล่อยสัญญาณพลังงานกลในช่วงสั้นๆ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ช่วงความถี่เมกะเฮิรตซ์ โดยถูกปล่อยเข้าไปในชิ้นวัสดุในระหว่างการตรวจสอบ โดยสัญญาณนี้จะแพร่กระจายเป็นคลื่นยืดหยุ่น (elastic waves) ส่วนหนึ่งของสัญญาณจะได้รับการตรวจพบโดยการสะท้อนกลับของคลื่นซึ่งเป็นลักษณะของความไม่ต่อเนื่องของวัสดุเมื่อพบสิ่งที่เป็นข้อบกพร่อง เช่น รอยแตก รุพ-run หรือสิ่งเจือปน ตัวอย่างที่เราัมักพบบ่อย ซึ่งอิงตามหลักการสัญญาณสะท้อนกลับ (pulse-echo) ที่คล้ายกัน แต่ใช้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic energy) โดยในการใช้เรดาร์เพื่อระบุระบบพายุตั้งที่เป็นอยู่พบเห็นได้ทั่วไปในรายงานสภาพอากาศทางโทรทัศน์, ในการเปลี่ยนแปลงโหมดการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเป็นการกระตุ้นและหาข้อบกพร่องหรือรอยเสียหายซึ่งจะแสดงออกโดยการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ ไปจนถึงเสียงสะท้อนที่แสดงถึงการแตกร้าว เทคนิคอัลตราโซนิกไม่จำกัดเพียงการตรวจจบบกพร่องด้วยลักษณะของคุณสมบัติของวัสดุ (เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น, ความพรุน, ขนาดเกรน, การวางแนวเกรน) แต่ยังรวมไปถึงคุณสมบัติโดยทั่วไปจากการวัดความเร็ว, การลดทอน หรือการกระเจิงกลับของพลังงานเหนือเสียง

หลักการทางกายภาพที่เป็นพื้นฐานของการตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นที่รู้จักมานานแล้วและขึ้นอยู่กับความร่วมมือที่สำคัญของผู้มีชื่อเสียงดังนี้

นักวิทยาศาสตร์อย่างแลมบีและ เรย์ลีห์ [53] อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติวิธีใช้งานยังไม่เป็นที่แพร่หลายจนกระทั่งมีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นในการสร้าง ช่วงความถี่วิทยุสั้น ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากความก้าวหน้าสำคัญที่เกิดขึ้นในเทคโนโลยีเรดาร์ ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง เครื่องมือวัดที่เกิดขึ้น ได้รับการดัดแปลงเพื่อแสดงการใช้งาน ช่วงคลื่นเสียงความถี่สูงที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน ความก้าวหน้าสำคัญที่เกิดขึ้นนั้นได้แก่

1. ผลลัพธ์ของผลกระทบเชิงปฏิวัติของสัญญาณดิจิทัล การประมวลผลที่อนุญาตให้มีการจัดเก็บข้อมูล และถูกดัดแปลงให้แตกต่างและซับซ้อนมากขึ้นในวิธีต่างๆ (เทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT): การประมวลผลสัญญาณและภาพ) และ
2. การพัฒนาทฤษฎี ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดปฏิสัมพันธ์ของอัลตราซาวด์และวัสดุ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการตีความเชิงปริมาณของผลการวัด

ตั้งแต่ในช่วงต้นปีค.ศ.1990 มีความสนใจในเรื่องดังกล่าวกลับมาอีกครั้ง เทคนิคเรโซแนนซ์[54] ที่ขับเคลื่อนด้วยเทคนิคบางอย่างโดยปัจจัยที่เหมือนกัน คลื่นอัลตราโซนิกจะถูกกระตุ้นด้วยตัวทรานสดิวเซอร์ซึ่งประกอบด้วย ตัวเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งประกอบอยู่ระหว่างชั้นห่วงและแผ่นหน้า เมื่อทรานสดิวเซอร์ถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า จากเครื่องส่งสัญญาณจะขยายหรือหดตัวตามที่กำหนด โดยหลักการของเพียโซอิเล็กทริก สัญญาณคลื่นยืดหยุ่น สั้น โดยทั่วไปจะเป็นสองสามรอบใกล้กับเสียงสะท้อน ความถี่ของหัวโซนาร์ที่ส่งสัญญาณจะถูกแผ่ออกไปและเข้าไปในวัตถุทดสอบหรือใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อำนาจควบคุมอุณหภูมิซึ่งจะตรวจพบสัญญาณอัลตราโซนิกในลักษณะเดียวกันหรือคล้ายกัน และผ่านตัวแปลงสัญญาณซึ่งกันและกัน ข้อจำกัดของทรานสดิวเซอร์เพียโซอิเล็กทริกคือ ความจำเป็นในการสร้างสื่อเชื่อมต่อระหว่างทรานสดิวเซอร์และส่วนวัสดุหรือสิ่งที่ต้องการตรวจสอบนี้ โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการจุ่ม วัสดุลงไปใต้น้ำควบคุมอุณหภูมิที่นำคลื่นอัลตราซาวด์จากทรานสดิวเซอร์ไปยังชิ้นส่วนที่ใช้ในการทดสอบโดยการแช่หรือใช้ติดกับสารที่เป็นของเหลวบางๆโดยตรงระหว่างทรานสดิวเซอร์ซึ่งเป็นการทดสอบแบบสัมผัส การสร้างตัวเชื่อมมีข้อจำกัดหลายประการดังนี้ การใช้งานกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวและที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น

เริ่มตั้งแต่ในต้นปีค.ศ. 1970 ซุตโพรบได้รับการพัฒนาให้ไม่จำเป็นต้องมีชิ้นที่เป็นสารติดกับสิ่งที่ต้องการตรวจสอบดังกล่าว ทรานสดิวเซอร์แม่เหล็กไฟฟ้า-อะคูสติก(EMAT)[55]ประกอบด้วยขดลวดและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสถิตย์ พื้นที่แม่เหล็กของพวกมันจะเหนี่ยวนำคู่กับคลื่นอัลตราโซนิกในโลหะโดยหลักการคล้ายคลึงกับที่ใช้ในมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้เลเซอร์สามารถกระตุ้นอัลตราซาวด์ผ่านปฏิกิริยาได้โดยการถ่ายโอนโมเมนตัม เป็นกระบวนการระเหยหรือการขยายตัวของความร้อนคือกระบวนการเทอร์โมออสติกและความสามารถในการตรวจจับคลื่นได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคอินเทอร์เฟอโรเมตริกต่างๆ ทรานสดิวเซอร์รวมองค์ประกอบเพียโซอิเล็กทริก

แต่ใช้เทคนิคพิเศษเพื่อลดการสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางเสียงที่ไม่ตรงกันระหว่างอากาศกับชิ้นส่วนที่เป็นของแข็งที่จะตรวจสอบ แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเพียโซอิเล็กทริกทั่วไป หัววัดแบบไม่สัมผัสเหล่านี้กำลังถูกใช้งานได้อย่างหลากหลายมากขึ้น พลังงานเหนือเสียงแพร่กระจายผ่านของแข็งที่เป็นวัตถุที่อยู่ระหว่างการตรวจสอบในรูปของคลื่นยืดหยุ่น [52] เนื่องจากธรรมชาติของตัวรับสัญญาณของ พื้นฐานของ ความเค้นและความเครียด การเกิดสมการคลื่นที่ยอมรับที่ใช้ในการการเกิดผลของคลื่นทั้ง สามระนาบสำหรับคลื่นที่แพร่กระจายไปในทิศทางใดๆ สำหรับวัสดุไอโซโทรปิก เช่น โพลีคริสตัลที่มีการวางแนวแบบสุ่มของผลึกนั้น สารละลายที่มีโพลาริเซชันเป็นแบบขนาน (คลื่นตามยาว หรือคลื่นอัด) หรือตั้งฉาก (คลื่นตามขวาง หรือแรงเฉือน) กับทิศทางของการขยายสัญญาณ ซึ่งหมายถึงว่า การเคลื่อนที่ของความยาวคลื่นในวัตถุ จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสองเท่าของคลื่นตามขวาง (นี่คือผลลัพธ์ที่แน่นอน เมื่อ อัตราส่วนปัวซอง คือ $1/3$) มุมมองง่ายๆ ของการแพร่กระจายคลื่นนี้ได้รับการแก้ไขโดยข้อพิจารณาเชิงปฏิบัติหลายประการในส่วนประกอบจริงและวัสดุในรูปแบบที่สามารถทำได้อย่างลึกซึ้งส่งผลกระทบต่อวิธีการตรวจสอบ ในวัสดุบางชนิด เช่นวัสดุคอมโพสิต ในทิศทางเดียวและโลหะนั่นเองซึ่งเป็นการพัฒนาพื้นผิวผลึกศาสตร์อย่างมีนัยสำคัญ (เช่น การเชื่อมของโครงสร้างจุลภาคบางอย่าง) ค่าคงที่ยืดหยุ่นเป็น แอนไอโซทรอปี ในกรณีเหล่านี้ ยังคงมีลักษณะของคลื่นสามระนาบ แต่โพลาริเซชันจะไม่มีลักษณะขนานหรือตั้งฉากแบบยาว กับทิศทางของการแพร่กระจาย อีกทั้ง การเคลื่อนที่ของพลังงานที่อาจจะไม่ได้ตั้งฉากกับส่วนหน้าของเฟสซึ่งเป็นปรากฏการณ์เรียกว่า การเปลี่ยนองศาการกระจายเสียงให้เข้ามาในทิศทางพื้นที่ที่กำหนด (beam steering) ในวัสดุจริงไม่สามารถตรวจพบด้วยคลื่นระนาบนี้ แต่สามารถพบลำแสงของมิติไฟไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น หลักการของการเลี้ยวเบนจะต้องนำมาพิจารณาพร้อมกับการกระจายลำแสงที่เกี่ยวข้องใน ระยะไกล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยแอนไอโซทรอปี

ชิ้นส่วนจริงปกติถูกล้อมรอบด้วยพื้นผิวเสมอและสิ่งเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบอย่างมากต่อ การแพร่กระจายของคลื่น ในกรณีที่ยากที่สุดของการตรวจสอบโดยผ่านระนาบพื้นผิว ซึ่งการหักเหอัน เป็นผลมาจาก อัลตราโซนิกคอนสตรัคทีฟกับกฎของสเนลล์ [56] ไม่ว่าจะคลื่นแนวยาวหรือแนวขวาง สามารถเกิดขึ้นได้ในของแข็ง พื้นผิวโค้งสามารถมีทั้งผลกระทบโพสิทีฟหรือเนกาทีฟก็ได้ การเกิดขึ้นของ คลื่นนำทางที่ถูกกระตุ้น สามารถเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวได้ คลื่นเรย์ลีที่ถูกเชื่อมไกลกับพื้นผิวเดียวที่ ปราศจากแรงเค้นและโหมดนำทางในเฟลตด้วยพื้นผิวขนาน ซึ่งมีคุณสมบัติหลายประการคล้ายคลึง กับโหมดแม่เหล็กไฟฟ้าของท่อนำคลื่น (waveguides) การใช้โหมดนำทางในการตรวจสอบกำลังได้รับความ สนใจเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสามารถที่ใช้ในการตรวจสอบวัสดุที่มีปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว

ปัจจัยสุดท้ายที่ต้องพิจารณาในการทำความเข้าใจ หลักการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก คือ การเกิดปฏิสัมพันธ์ของพลังงานคลื่นยืดหยุ่นกับรอยร้าวหรือโครงสร้างของวัสดุ ทฤษฎีการ กระจายเป็นบทบาทสำคัญ มีเทคนิคที่หลากหลายที่ทำให้เกิดความเข้าใจปฏิสัมพันธ์เหล่านี้ ตั้งแต่จาก แนวทางเชิงตัวเลขล้วนๆ บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปจนถึงเทคนิคการวิเคราะห์เพิ่มเติม รูปแบบ เช่น การแก้ปัญหาโดยการแยกตัวแปรเพื่อกระจายเรขาคณิตอย่างง่าย

การใช้งาน

ตามที่ระบุไว้ข้างต้น ในการใช้งานประกอบด้วย การตรวจจับข้อบกพร่อง (flaw detection) การระบุลักษณะข้อบกพร่อง (flaw characterization) และลักษณะเฉพาะของวัสดุ (material characterization) สิ่งเหล่านี้จะพบได้ในวงกว้างในอุตสาหกรรม การใช้งานในช่วงแรกถูกใช้ใน อุตสาหกรรมการบินและอวกาศและอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นการใช้เพื่อให้ทราบผลที่ตามมาของ ความล้มเหลวซึ่งถือเป็นหายนะที่สุดและยังเป็นแรงจูงใจทางการเงินอย่างมากสำหรับการมีโปรแกรม การตรวจสอบโดยละเอียด (inspection) ที่มีเพิ่มมากขึ้น เป็นการเพิ่มความสนใจที่มากขึ้นกับปัญหา ของลักษณะเฉพาะของวัสดุ แรงจูงใจประการหนึ่งคือความปรารถนาที่จะติดตามการเสื่อมสภาพใน คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน ซึ่งจะเป็นปัญหาที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นโดยความเสื่อม ของโครงสร้างพื้นฐานและความต้องการที่จะยืดอายุของระบบโครงสร้างต่างๆ ด้วยเหตุผลทาง เศรษฐกิจ แรงจูงใจอีกประการหนึ่งคือความสนใจที่เพิ่มขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพและความน่าเชื่อถือ ของส่วนประกอบที่ผลิต

ความสามารถและข้อจำกัดในการใช้การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง

ในการตรวจจับข้อบกพร่อง หนึ่งในความพยายามตรวจจับสัญญาณที่อ่อนโยนกลับจาก กลับมาจากวัสดุสะท้อนที่ขนาดเล็ก ขนาดของวัสดุสะท้อนซึ่งถูกตรวจจับได้จะถูกกำหนดโดยความ แรงของสัญญาณที่ถูกตรวจจับได้ สิ่งเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากส่วนหนึ่งพื้นผิวที่อยู่ใกล้กับตำหนิ (สัญญาณ เชิงเรขาคณิต), โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ (เช่น สัญญาณรบกวนสะท้อนกลับจากขอบเขตของเกรน),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรบกวนจากแหล่งที่มาของกระแสไฟฟ้า (เช่น สเต็ปมอเตอร์) หรือ สัญญาณรบกวนความร้อน ในเครื่องขยายเสียงที่รับคลื่น ในการทดสอบที่มีความอ่อนไหวมากจึงยากที่จะทำการตรวจสอบ โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบจะถูกเลือกเพื่อให้ความยาวคลื่นมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโครงสร้างจุลภาค (เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการลดทอนและการกระเจิงกลับที่มากเกินไป) และข้อบกพร่องหรือรอยเสียหายจะต้องอยู่ในลำดับความยาวคลื่นที่ตรวจพบได้ (เนื่องจากความแรงของการกระเจิงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอัตราส่วนของขนาดความเสียหายต่อความยาวคลื่น) ผลสามารถถูกใช้ในการประยุกต์ใช้ตรวจพบรอยเสียหายได้โดยขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบไมโครเมตร (เซรามิกเนื้อละเอียดตรวจสอบด้วยความถี่หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์) ถึงหลายเซนติเมตร (ความถี่ต่ำจากการตรวจสอบคอนกรีต) ในโลหะหลายชนิด ขนาดตำหนิเป็นมิลลิเมตรเป็นต้นและสิ่งนี้อาจจะเป็นข้อจำกัดเพิ่มเติมที่เกี่ยวกับผลของการหักเหที่ส่วนต่อประสานและการโพกัสหรือไม่สามารถโพกัสได้ [57] ถ้าหากอินเทอร์เฟซเหล่านี้ไม่ได้เป็นระนาบ ผลกระทบเหล่านี้จะมีนัยสำคัญค่อนข้างมากเพราะความเร็วของเสียงในโลหะทั่วไปเป็นสี่เท่าของน้ำซึ่งเป็นสื่อกลางที่พบบ่อยที่สุดที่ใช้สำหรับการตรวจสอบที่มีการแผ่รังสี

ข้อจำกัดเหล่านี้ถือเป็นแรงจูงใจหลักประการหนึ่งสำหรับความสนใจในเทคนิคเรโซแนนซ์อีกครั้ง ปรึชญาพื้นฐานเพื่อที่จะรับข้อมูลของรอยเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ เพราะว่าสัญญาณข้อบกพร่องจากสัญญาณทางเรขาคณิตไม่สามารถตรวจพบได้ทันเวลาในรอยบกพร่องที่อยู่ค่อนข้างชิดกับขอบเขตและมีการหักเห อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญคือชิ้นส่วนต่างๆที่มีการควบคุมรูปทรงสูง เนื่องจากเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่มีการเปลี่ยนแปลงอาจถูกแปลผลการมีจุดเสียหายที่มีภายใน

ในการประเมินความเสียหาย มีการตรวจสอบข้อบกพร่องดังกล่าวโดยใช้ พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดข้อบกพร่อง รูปร่าง และการวางแนว ตัวอย่างของปัญหาผกผัน และความท้าทายเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดในข้อมูลที่มีอยู่ (ความถี่ถูกจำกัดโดยโครงสร้างจุลภาคของวัสดุและมุมสังเกตที่เป็นไปได้คือถูกจำกัดด้วยส่วนของโครงสร้าง) และการมีอยู่ของเสียงรบกวน เนื่องจากข้อจำกัดเหล่านี้โดยทั่วไปทำให้เราไม่สามารถได้ข้อมูลเพียงพอที่จะตรวจพบความเสียหายที่สมบูรณ์ได้ทำให้เกิดการนำความรู้เบื้องต้นที่ช่วยลดปริมาณข้อมูลที่ต้องอนุมานจากข้อมูล ตัวอย่างเช่น ถ้าใครรู้ว่ามีประวัติบริเวณไหนมีตำหนิ นั้น น่าจะมีรอยร้าวแล้วค่อยหา ส่วนการหาขนาดและแนวของรอยแตกร้าว นั้นเป็นปัญหาที่ตรวจได้ยากกว่าการพยายามสร้างโครงสร้างสามมิติ

ในการประยุกต์ใช้การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของวัสดุ ปัญหาจะแตกต่างกัน โดยอาจจะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างระดับจุลภาคเช่น ขนาดเกรน หรือคุณสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรง (Strength) ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่หลากหลายอาจขึ้นกับความเร็วอัลตราโซนิก (Ultrasonic velocity) การลดทอน (attenuation) และการกระเจิงกลับ (Back scattering) ซึ่งมีผลต่อความไวต่อคุณสมบัติที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามผลการทดสอบอาจไม่เฉพาะเจาะจง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านคุณลักษณะทางกล ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่กำหนดลักษณะทางโครงสร้างระดับจุลภาคซึ่งบางส่วนอาจไม่สามารถถูกตรวจสอบได้ด้วยคลื่นอัลตราซาวนด์

ในทุกกรณีเหล่านี้ การประเมินแบบไม่ทำลาย ต้องทำการดำเนินการได้รวดเร็วและคุ้มค่าที่สุด ในตลาดที่มีการแข่งขันสูงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการตรวจสอบมีความจำเป็นต้องทำให้เกิดความสมดุลอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับมูลค่าที่เพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ โดยประเด็นนี้มีอิทธิพลอย่างมากจากประเด็นต่างๆ เช่น ผลที่ตามมาของความล้มเหลว ซึ่งมีส่วนเกี่ยวเนื่องกับความปลอดภัยทางสาธารณะและหรือความสูญเสียทางเศรษฐกิจ

2.5 การทดสอบด้วยการปล่อยคลื่นอะคูสติก

การปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission, AE) [58] หมายถึงการสร้างคลื่นยืดหยุ่นชั่วคราว (transient elastic waves) ที่เกิดจากการกระจายตัวของความเค้นในวัสดุอย่างกะทันหัน เมื่อโครงสร้างอยู่ภายใต้สิ่งเร้าภายนอก (การเปลี่ยนแปลงของความดัน โหลดแรง หรือ อุณหภูมิ) แหล่งที่มาของสิ่งเร้าจะกระตุ้นให้เกิดการปล่อยพลังงาน ในรูปของคลื่นความเครียดซึ่งแพร่กระจายไปยังพื้นผิวและจะถูกบันทึกโดยเซ็นเซอร์ ด้วยอุปกรณ์และการตั้งค่าที่เหมาะสม จึงสามารถระบุการเคลื่อนไหวตามลำดับของพีโคมิเตอร์ (10 -12 เมตร) ได้ แหล่งที่มาของการปล่อยคลื่นเสียงแตกต่างกันไปตั้งแต่เหตุการณ์ธรรมชาติ เช่น แผ่นดินไหวและการระเบิดของหิน ไปจนถึง การเริ่มต้นและการขยายตัวของรอยแตก การเคลื่อนตัวของรอยแยก การหลอมละลายและการเปลี่ยนแปลงเฟสในโลหะ ในวัสดุคอมโพสิต การแตกร้าวของเมทริกซ์และการแตกของเส้นใยและการหลุดออกมีส่วนทำให้เกิดการปล่อยเสียง นอกจากนี้ การปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ยังใช้ในการวัดและการบันทึกในโพลีเมอร์ ไม้ คอนกรีต รวมถึงวัสดุอื่นๆด้วย [11]

การตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน สามารถให้ข้อมูลอันมีคุณค่าเกี่ยวกับที่มาและความสำคัญของความไม่ต่อเนื่องในวัสดุได้ เนื่องจากความอ่อนกประสงค์ของการทดสอบการปล่อยเสียงจึงมีการนำไปใช้งานทางอุตสาหกรรมมากมาย (เช่น การประเมินความสมบูรณ์ของโครงสร้าง การตรวจจับข้อบกพร่อง การทดสอบการร้าวไหล หรือการตรวจสอบคุณภาพการเชื่อม) และมีการใช้อย่างกว้างขวางเป็นเครื่องมือในการวิจัย

การปล่อยเสียงนั้นแตกต่างจากเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) อื่นๆมีสองประการความแตกต่างประการแรกเกี่ยวข้องกับที่มาของสัญญาณ แทนที่จะจ่ายพลังงานให้กับวัตถุที่กำลังตรวจสอบ แต่การทดสอบด้วยการปล่อยเสียงจะคอยฟังพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากวัตถุนั้น การทดสอบ AE มักจะดำเนินการกับโครงสร้างในขณะที่ใช้งานอยู่ เนื่องจากมีการโหลดที่เพียงพอสำหรับการเกิดการขยายของความเสียหายและเป็นสิ่งกระตุ้นให้เกิดการปล่อยเสียง

ข้อแตกต่างประการที่สองคือการทดสอบด้วยการปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชัน เกี่ยวข้องกับกระบวนการไดนามิกหรือการเปลี่ยนแปลงในวัสดุ สิ่งนี้มีความหมายอย่างยิ่งเพราะเป็นการแสดงถึงสิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ยังไม่สงบอยู่ (เช่น การขยายของรอยร้าว) ความสามารถในการแยกแยะระหว่างข้อบกพร่องที่กำลังพัฒนาและข้อบกพร่องที่หยุดนิ่งแล้วเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตาม อาจเป็นไปได้ที่ข้อบกพร่องต่างๆ จะไม่สามารถถูกตรวจพบได้ หากการให้แรงไม่มากพอที่จะทำให้เกิดเหตุการณ์ทางเสียง นอกจากนี้ การทดสอบด้วยการปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชัน มักจะให้ข้อบ่งชี้ทันทีเกี่ยวกับความแข็งแรงหรือความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดความล้มเหลวในวัสดุต่างๆ และข้อดี ได้แก่ การตรวจสอบปริมาตรที่รวดเร็วและสมบูรณ์โดยใช้เซ็นเซอร์หลายตัว การติดตั้งเซ็นเซอร์แบบถาวรสำหรับการควบคุมกระบวนการ และไม่จำเป็นต้องถอดแยกชิ้นส่วนและทำความสะอาดชิ้นงาน

น่าเสียดายที่ระบบการปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชัน สามารถวัดปริมาณความเสียหายที่มีอยู่ในโครงสร้างได้ในเชิงคุณภาพเท่านั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เชิงปริมาณเกี่ยวกับขนาด ความลึก และการยอมรับโดยรวมของชิ้นส่วน จำเป็นต้องใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายอื่นๆ (ซึ่งมักจะเป็นการทดสอบด้วยการใช้การทดสอบโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง) ข้อเสียเปรียบอีกประการหนึ่งของการปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชัน เกิดจากสภาพแวดล้อมการให้บริการที่มีเสียงดังซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากภายนอก เพื่อการใช้งานที่ประสบความสำเร็จ การแบ่งแยกสัญญาณและการลดเสียงรบกวนถือเป็นสิ่งสำคัญ

โดยการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วเป็นสิ่งจำเป็นหากคลื่นยืดหยุ่น มีปริมาณพลังงานที่มากปล่อยออกมาในระหว่างการเปลี่ยนรูปจะปรากฏเป็นการปล่อยเสียง เมื่อคลื่นเหล่านี้เดินทางผ่านวัตถุ รูปร่างของพวกมันก็เปลี่ยนไปอย่างมาก โดยสัญญาณที่เซ็นเซอร์ตรวจพบคือการรวมกันของหลายส่วนของรูปคลื่นที่ปล่อยออกมาในตอนแรก การเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิดเสียงที่ปล่อยออกมาจะเสร็จสิ้นภายในไม่กี่ล้านวินาที เมื่อการปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชันออกจากแหล่งกำเนิด รูปคลื่นจะเคลื่อนที่ในรูปแบบที่กระจายเป็นทรงกลม และสะท้อนออกจากขอบเขตของวัตถุ สัญญาณที่อยู่ในเฟสซึ่งกันและกันเมื่อไปถึงเซ็นเซอร์จะทำให้เกิดการรบกวนเชิงสร้างสรรค์ ซึ่งโดยปกติจะส่งผลให้รูปคลื่นตรวจพบจุดสูงสุดโดย ช่วงเวลาโดยทั่วไปตั้งแต่เมื่อคลื่นเสียงอะคูสติกอิมิชชัน สะท้อนรอบๆ ชิ้นทดสอบ (กระตุ้นเซ็นเซอร์ซ้ำๆ) จนกระทั่งคลื่นสลายตัว มีตั้งแต่ 100 ไมโครวินาที ในวัสดุโลหะที่มีการหน่วงสูง ไปจนถึงสิบล้านวินาทีในวัสดุโลหะที่มีการหน่วงเล็กน้อย

การลดทอน (Attenuation)

ความเข้มของสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ที่เซ็นเซอร์ตรวจพบนั้นต่ำกว่าความเข้มที่จะสังเกตได้ในบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดอย่างมาก นี่เป็นเพราะการลดทอนที่เกิดขึ้น สาเหตุหลักของการลดทอนมีสามสาเหตุ โดยเริ่มจากการแพร่กระจายทางเรขาคณิต เมื่อปล่อยเสียงอะคูสติกอิมิชชัน แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดไปในวัสดุที่มีลักษณะคล้ายแผ่น แอมพลิจูดของมันก็จะลดลงร้อยละ 30 ทุกครั้งที่มันเพิ่มระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเป็นสองเท่า ในโครงสร้างสามมิติ สัญญาณจะสลายตัวประมาณร้อยละ 50 นี้สามารถย้อนกลับไปสู่การอนุรักษ์พลังงานอย่างง่าย สาเหตุของการลดทอนอีกประการหนึ่งคือการหน่วงของวัสดุ ในขณะที่คลื่นเสียงอะคูสติกอิมิชชัน เคลื่อนผ่านวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยืดหยุ่นของคลื่นและพลังงานจลน์จะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน สาเหตุที่สามของการลดทอนคือการกระเจิงของคลื่น ความไม่ต่อเนื่องทางเรขาคณิต (เช่น ขอบเขตคูก การรวมของอโลหะ หรือขอบเขตของเกรน) และขอบเขตเชิงโครงสร้างมีทั้งการสะท้อนถึงพลังงานคลื่นบางส่วนที่ถูกส่งในตอนแรก

การวัดผลกระทบของการลดทอนสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน สามารถทำได้ด้วยอุปกรณ์ง่ายๆ ที่เรียกว่าแหล่งกำเนิดซู นิลเซ็น (Hsu-Nielson) ประกอบด้วยดินสอกดที่มีไส้ดินสอด 2เอช ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 หรือ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งส่งผ่านเทปลอนรูปทรงกรวยซึ่งออกแบบมาเพื่อให้สัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุที่มุม 30 องศา เมื่อไส้ดินสอดถูกกดและหักเข้ากับวัสดุ จะทำให้เกิดการเสีรูปเล็กน้อยเฉพาะที่ ซึ่งเป็นการปลดปล่อยออกมาในรูปของ คลื่นความเครียด คล้ายกับสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ที่เกิดจากรอยแตกร้าว [21] ด้วยการใช้วิธีการนี้ แหล่งกำเนิดสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน จำลองสามารถสร้างขึ้นได้ที่จุดต่างๆ บนโครงสร้างเพื่อกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางตำแหน่งเซนเซอร์ และเพื่อให้แน่ใจว่าพื้นที่ที่สนใจทั้งหมดอยู่ภายในช่วงการตรวจจับของเซนเซอร์

อุปกรณ์ปล่อยเสียง (Acoustic Emission Equipment)

การทดสอบการปล่อยเสียงสามารถทำได้ในภาคสนามด้วยเครื่องมือแบบพกพาหรือในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไป ระบบประกอบด้วยเซ็นเซอร์ (sensor) ตัวขยายสัญญาณ (preamplifier) ตัวกรองสัญญาณ (filter) และแอมพลิฟายเออร์ (amplifier) พร้อมด้วยอุปกรณ์การวัด จอแสดงผล และอุปกรณ์จัดเก็บ (เช่น ออสซิลโลสโคป โวลต์มิเตอร์ และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล) เซ็นเซอร์ปล่อยเสียงตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวแบบไดนามิกที่เกิดจากเหตุการณ์การปล่อยสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ซึ่งสามารถทำได้ผ่าน ทรานสดิวเซอร์ ที่แปลงการเคลื่อนที่เชิงกลให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า องค์ประกอบของทรานสดิวเซอร์ในเซ็นเซอร์สัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน มักเป็นผลึก เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งโดยทั่วไปมักทำจากเซรามิก เช่น เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ทรานสดิวเซอร์ถูกเลือกตามความถี่ในการทำงาน ความไว และคุณลักษณะด้านสิ่งแวดล้อม และแบ่งออกเป็นสองประเภท: แบบเรโซแนนซ์และ บรอดแบนด์ อุปกรณ์สัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ส่วนใหญ่ตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวในช่วงความถี่การทำงานโดยทั่วไปที่ 30 กิโลเฮิรซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรซ์ สำหรับวัสดุที่มีการลดทอนสูง (เช่น พลาสติกคอมโพสิต) อาจใช้ความถี่ต่ำเพื่อแยกแยะสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ได้ดีขึ้น

ตามอุดมคติ สัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ที่ไปถึงเมนเฟรมจะปราศจากเสียงรบกวนพื้นฐาน (background noise) และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า นำเสียดายที่สิ่งนี้ไม่สมจริง อย่างไรก็ตาม เซ็นเซอร์และปรีแอมพลิฟายเออร์ได้รับการออกแบบมาเพื่อช่วยกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการ ขึ้นแรก ตัวขยายสัญญาณจะช่วยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้เพิ่มความสามารถในการจับเคลื่อนสัญญาณ เพื่อลดการรบกวนให้น้อยที่สุด ให้อ่างตัวขยายสัญญาณไวใกล้กับทรานสดิวเซอร์ อันที่จริง ทรานสดิวเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนมากในปัจจุบันมีการติดตั้งตัวขยายสัญญาณในตัว จากนั้น สัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวกรองแบนด์พาสเพื่อกำจัดความถี่ต่ำ (โดยทั่วไปกับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง) และความถี่สูง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการนี้ สัญญาณจะเดินทางไปยังเมนเฟรมของระบบเสียงและสุดท้ายไปยังคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่คล้ายกันเพื่อการวิเคราะห์และจัดเก็บ อาจจำเป็นต้องกรองหรือขยายเพิ่มเติมที่เมนเฟรม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของสัญญาณรบกวน

หลังจากผ่านเฟรมหลักของระบบการปล่อยสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน สัญญาณจะเข้าสู่วงจรการตรวจจับ/การวัด โดยวงจรการวัดหลายรายการสามารถใช้ในระบบเซ็นเซอร์/ช่องสัญญาณหลายระบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการระบุตำแหน่งแหล่งที่มาที่วงจรการวัด รูปร่างของสัญญาณปรับสภาพจะถูกเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเกณฑ์ที่ผู้ปฏิบัติงานตั้งโปรแกรมไว้ สัญญาณเป็นแบบต่อเนื่อง (อนาล็อกเกาส์เซียน, สัญญาณรบกวนแบบสุ่มที่มีแอมพลิจูดแตกต่างกันไปตามขนาดของเหตุการณ์สัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน) หรือแบบประเภทระเบิดแตกออก แต่ละครั้งที่แรงดันไฟฟ้าเกินเกณฑ์ วงจรการวัดจะปล่อยออกมาเป็นสัญญาณดิจิทัลโดย สัญญาณแรกแสดงถึงการเริ่มต้นของการกระทบความเสียหาย (การกระทบใช้เพื่ออธิบายเหตุการณ์การปล่อยสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน ที่เซ็นเซอร์เฉพาะนั้นตรวจพบ เหตุการณ์ สัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชันหนึ่งเหตุการณ์จะถูกระบบที่มีหลายช่องสัญญาณบันทึกสัญญาณที่ถูกกระทบหลายครั้ง) สัญญาณจะยังคงถูกสร้างขึ้นต่อไปในขณะที่สัญญาณเกินแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) เมื่อกระบวนการนี้หยุดตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ การกระทบจะเสร็จสิ้น ข้อมูลจากการกระทบจะถูกอ่านลงในไมโครคอมพิวเตอร์ และวงจรการวัดจะถูกรีเซ็ตอีกครั้ง

ลักษณะสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน [59]

เมื่อได้ติดตั้งอุปกรณ์กำหนดค่าและตั้งค่าเสร็จสมบูรณ์แล้ว เซ็นเซอร์เชื่อมต่อกับพื้นผิวทดสอบและยึดให้เข้าที่ด้วยเทปหรือกาว จากนั้นผู้ปฏิบัติงานจะตรวจสอบสัญญาณที่ถูกกระตุ้นจากความเครียดที่เกิดขึ้นในวัตถุ เมื่อได้รับสัญญาณชั่วคราวหรือสัญญาณระเบิดแตกออก ที่มีประโยชน์อย่างถูกต้อง พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แอมพลิจูด จำนวนนับ พื้นที่ที่วัดได้ภายใต้ขอบเขตสัญญาณที่แก้ไข (MARSE) ระยะเวลา และเวลาที่เพิ่มขึ้นสามารถรวบรวมได้ โดยคุณสมบัติสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน มีดังนี้และแสดงไว้ในรูปที่ 10

แอมพลิจูด เอ คือแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มากที่สุดในรูปแบบคลื่นและมีหน่วยวัดเป็นเดซิเบล (dB) นี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจสอบการปล่อยเสียงเนื่องจากเป็นตัวกำหนดความสามารถในการตรวจจับของสัญญาณ สัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่ำกว่าเกณฑ์ที่ผู้ปฏิบัติงานกำหนด เกณฑ์ขั้นต่ำจะไม่ถูกบันทึก

ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) คือช่วงเวลาระหว่างการข้ามเทรชโฮลต์อันดับแรก (first threshold) และถึงจุดสูงสุดของสัญญาณ โดยพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของคลื่นระหว่าง

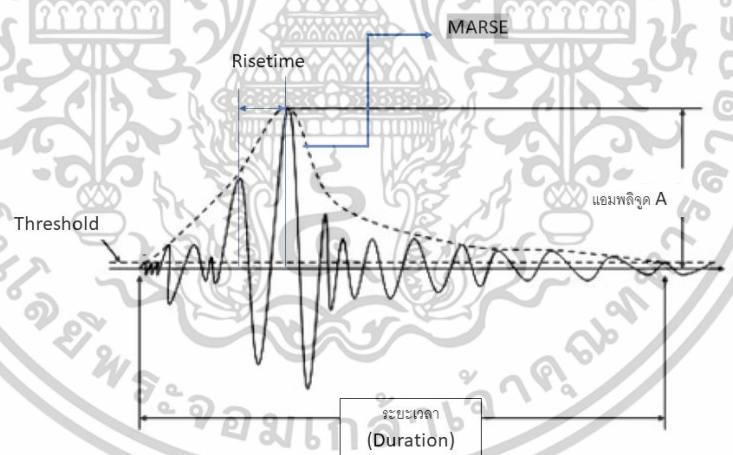
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดของการปล่อยเสียงและเซ็นเซอร์ ดังนั้นช่วงเวลานี้จึงใช้สำหรับแสดงคุณสมบัติของสัญญาณและเป็นเกณฑ์สำหรับตัวกรองสัญญาณรบกวน

ระยะเวลา (Duration) คือความแตกต่างของเวลาระหว่างเทรซโฮลต์อันดับแรก และเทรซโฮลต์อันดับสุดท้าย ระยะเวลาสามารถใช้เพื่อระบุแหล่งที่มาประเภทต่างๆ และกรองสัญญาณรบกวนออก เช่นเดียวกับจำนวน (N) พารามิเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณและเสียงของวัสดุ

มาร์ช (MARSE) หรือบางครั้งเรียกว่า จำนวนพลังงาน (energy count) คือการวัดพื้นที่ใต้เปลือกของสัญญาณเวลาแรงดันไฟฟ้าเชิงเส้นที่แก้ไขแล้วจากทรานสดิวเซอร์ นี่ถือได้ว่าเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณสัมพันธ์และมีประโยชน์เนื่องจากสามารถกำหนดพลังงานของการแผ่กระจายได้นอกจากนี้ มาร์ชยังมีความไวต่อระยะเวลาและแอมพลิจูดของสัญญาณ แต่ไม่ได้ใช้การนับหรือเกณฑ์และความถี่ที่ผู้ใช้กำหนดมาร์ชถูกนำมาใช้เป็นประจำในการวัดการปล่อยเสียง

เคาน์ท์ (Counts) หมายถึงจำนวนช่วงสัญญาณที่ปล่อยออกมาจากวงจรการวัด หากแอมพลิจูดของสัญญาณมากกว่าเกณฑ์ ขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน และลักษณะของวัสดุ การกระทบหนึ่งครั้งอาจทำให้เกิดช่วงสัญญาณหนึ่งครั้งหรือหลายครั้ง แม้ว่านี่จะเป็นพารามิเตอร์ที่ค่อนข้างง่ายในการรวบรวม แต่โดยปกติแล้วจะต้องรวมกับการวัดแอมพลิจูดและ/หรือระยะเวลาเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพเกี่ยวกับรูปร่างของสัญญาณ



รูปที่ 10 แสดงถึงคุณสมบัติของสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชัน

การแปลงเวฟเลิตแบบต่อเนื่อง [60]

การทำเวฟเลิตเป็นการใช้คณิตศาสตร์มาเพื่อวิเคราะห์และสังเคราะห์ลักษณะของสัญญาณซึ่งใช้ในงานประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบใดระบบหนึ่ง ทั้งทางการแพทย์และทางวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งการหาขอบภาพ การลดขนาดข้อมูลต่างๆ มีหลากหลายประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ ใช้ การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การเปลี่ยนคุณสมบัติของเวฟเล็ตแม่ คือ ช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่แคบในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่สูงและช่วงในการวิเคราะห์ที่กว้างในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ต่ำ โดยเป็นการปรับความละเอียดในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องให้เหมาะสมกับความถี่ที่ทำการวิเคราะห์ แสดงสมการสำหรับการวิเคราะห์ที่ได้ดังต่อไปนี้

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.2)$$

เมื่อ $f(t)$ = สัญญาณที่ทำการแปลง

$\psi(t)$ = เวฟเล็ตแม่

a = แพลคเตอร์สเกล (scale)

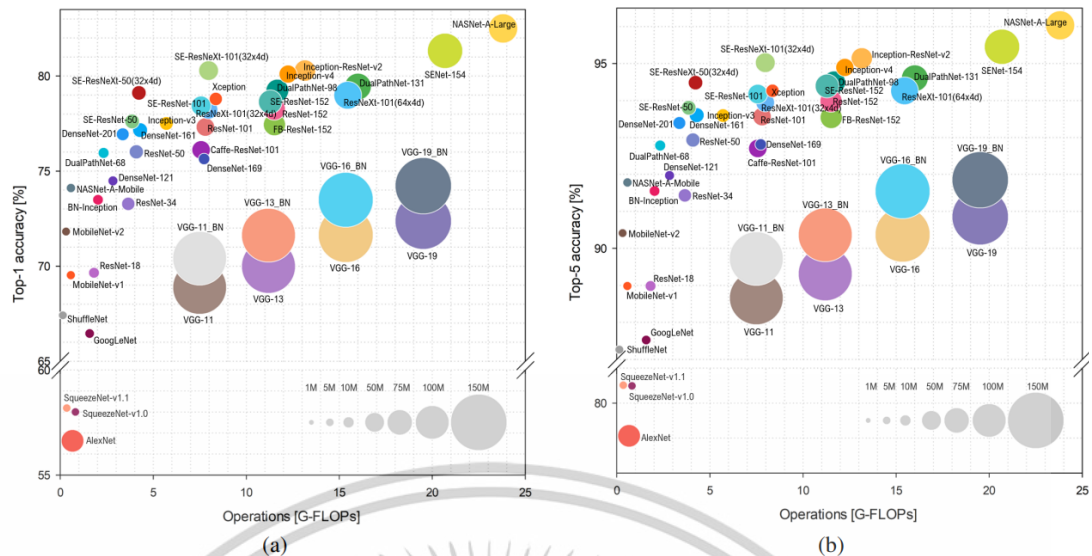
b = แพลคเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (shifting)

จากสมการ (2.2) เมื่อพิจารณา $\psi(t)$ ซึ่งเป็นค่าของเวฟเล็ตแม่ที่เทียบได้กับค่าของฟังก์ชันหน้าต่างในการแปลงฟูรีเย(fourier) ช่วงเวลานั้นเอง เมื่อพิจารณาเทอมของ $\psi(t)$ จะมีการเปลี่ยนคุณสมบัติไปตามพารามิเตอร์ a และ b ซึ่งสามารถแสดงลักษณะในการวิเคราะห์ เมื่อผลการวิเคราะห์ของแต่ละสเกลแต่ละส่วนของสัญญาณและการแปลงเป็นไปในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์จะแสดงออกในรูปแบบความสัมพันธ์ของเวลาและความถี่ (Time-Scale) ซึ่งทำให้ความแม่นยำทางด้านเวลาและความถี่ที่ดี แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างมากและอาจใช้ข้อมูลซ้ำซ้อนที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น

2.6 โครงข่ายประสาทเทียมแบบดั้งเดิม

การเลือกสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน [61] ที่จะกล่าวถึงในบทความนี้ ไม่ได้เกิดขึ้นแบบสุ่ม แต่ขึ้นอยู่กับความนิยมและประสิทธิภาพในรูปแบบการตรวจจำวัตถุที่ทันสมัยที่แตกต่างกัน เปียนโคและคณะในปีค.ศ.2018 ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบความถูกต้องเพื่อจัดลำดับของความถูกต้อง 5 อันดับสูงสุดและการปฏิบัติการจุดลอยตัวต่อวินาที (Operation (G-FLOPs)) [62] ของแต่ละสถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมที่เป็นที่นิยม ดังรูปที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แผนผังลูกบอลรายงานความถูกต้อง 1 อันดับสูงสุด และ 5 อันดับสูงสุดเทียบกับความซับซ้อนในการคำนวณ การใช้ความถูกต้องระดับ 1 อันดับสูงสุดและ 5 อันดับสูงสุด[19]

สถาปัตยกรรมของอเล็กซ์เน็ต (AlexNet) [63]

คริสเชฟสกี (Krizhevsky) และคณะ ในปีค.ศ. 2012 ได้พัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมแบบหมุนวนที่ประกอบด้วย 8 ชั้นโดยที่ 5 ชั้นเป็นแบบคอนโวลูชัน และ 3 ชั้นเป็นชั้นเชื่อมต่อแบบสมบูรณ์ (fully connected) เครือข่ายนี้เรียกว่าอเล็กซ์เน็ต เมื่อเปรียบเทียบกับเลอเน็ตห้า (LeNet-5) แล้วอเล็กซ์เน็ตมีเลเยอร์มากกว่าและมีพารามิเตอร์ประมาณ 60 ล้านพารามิเตอร์ ฟังก์ชันเรกติไฟด์ลินีเยยูนิต (Rectified Linear Units, ReLUs) ถูกใช้เป็นการเปิดใช้งานในอเล็กซ์เน็ต แทนการเปิดใช้งานฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid) และฟังก์ชันทานฮ์ (tanh) เพื่อใช้ ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของอเล็กซ์เน็ต ใช้โมเดลการตรวจจับวัตถุ เช่น อาร์-ซีเอ็นเอ็น (R-CNN) และ ไฮเปอร์เน็ต (HyperNet)

สถาปัตยกรรมของวีจีจี-16 (VGG-16) [64]

ในปี 2014 เครือข่ายชื่อ วีจีจี-16 ได้รับการเผยแพร่ ประกอบด้วย 13 ชั้นแบบคอนโวลูชัน และ 3 ชั้นแบบเชื่อมต่อแบบสมบูรณ์พร้อมการเปิดใช้งานฟังก์ชันเรกติไฟด์ลินีเยยูนิต วีจีจี-16 มีเลเยอร์มากกว่าเมื่อเทียบกับอเล็กซ์เน็ต และใช้ตัวกรองขนาดเล็กกว่า 2 คูณ 2 และ 3 คูณ 3 โดยมีพารามิเตอร์ 138 ล้านพารามิเตอร์ มี วีจีจี-16 เวอร์ชันลึกที่เรียกว่า วีจีจี-19 ให้เลือกใช้งาน วีจีจี-16 เป็นหนึ่งในสถาปัตยกรรมที่ใช้มากที่สุดในการตรวจจับวัตถุและบรรลุประสิทธิภาพที่น่าสนใจ มันถูกใช้เป็นตัวอย่างในอัลกอริธึมเช่น ฟาส อาร์-ซีเอ็นเอ็น (Fast R-CNN), ฟาสเตอร์ อาร์-ซีเอ็นเอ็น (Faster R-CNN), ไฮเปอร์เน็ต (HyperNet), เอส เอส ดี (SSD) และ เรตินาเน็ต (RetinaNet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาปัตยกรรมของกูเกิ้ลเน็ต [65]

กูเกิ้ลเน็ต [15] มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า อินเซพชันหนึ่ง (InceptionV1) เป็นเครือข่ายขนาดเล็กที่พัฒนาโดย สจีกิตี (Szegedy) และคณะ ในปี ค.ศ. 2014 วิธีการของพวกเขาแตกต่างจากวิธีจีเน็ตและอเล็กซ์เน็ต พวกเขาเกิดแนวคิดใหม่ที่เรียกว่าบล็อกของอินเซพชัน (Block of Inception) ซึ่งเป็นการฝังการเปลี่ยนแปลงแบบคอนโวลูชันหลายระดับ บล็อกของอินเซพชันประกอบด้วยตัวกรองขนาดต่างๆ 1 คูณ 1, 3 คูณ 3 และ 5 คูณ 5 มั่นใช้คอนโวลูชัน 1 คูณ 1 ที่อยู่ตรงกลางของเครือข่ายเพื่อลดมิติข้อมูลและพวกเขาเลือกที่จะใช้ การหาค่าเฉลี่ยรวมของการแยกคุณลักษณะของพื้นที่ (global average pooling) แทนการเชื่อมต่อกันของแต่ละชั้นอย่างสมบูรณ์ (fully connected layers) เครือข่ายประกอบด้วย 22 เลเยอร์พร้อมพารามิเตอร์ 5 ล้านพารามิเตอร์ กูเกิ้ลเน็ตส่วนใหญ่จะใช้ในโมเดลการตรวจจับวัตถุ โยโล (YOLO)

สถาปัตยกรรมของเรสเน็ต (ResNet) [63, 65, 66]

โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน มีความลึกมากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยการเพิ่มเลเยอร์ แต่เมื่อความแม่นยำอิ่มตัว มันก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว เพื่อแก้ไขปัญหานี้ ฮีและคณะ ในปี ค.ศ. 2015 ได้พัฒนาเรสเน็ต ซึ่งขึ้นกับ เรสิดวล (residuals) หรือ สคิป คอนเนกชัน (skip connections) พวกเขาใช้ แบช นอร์มอลไลเซชัน (Batch Normalization) เรสเน็ตส่วนใหญ่ประกอบด้วย บล็อกคอนโวลูชันและบล็อกไอเดนติตี้ เรสเน็ตส์มีหลากหลายรูปแบบ เช่น เรสเน็ตส์-34, เรสเน็ตส์-50 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ 26 ล้านพารามิเตอร์, เรสเน็ตส์-101 ที่มีพารามิเตอร์ 44 ล้านพารามิเตอร์ และเรสเน็ตส์-152 ซึ่งมีความลึกมากกว่า 152 เลเยอร์ เรสเน็ตส์-50 และเรสเน็ตส์-101 ใช้กันอย่างแพร่หลายในโมเดลการตรวจจับวัตถุ ในขณะที่ เรสเน็ตส์-50 ถูกใช้ในกรอบงานการตรวจจับวัตถุบางอย่าง เช่น เรตรินาเน็ต เรตรินาเน็ต-101 ใช้ในฟาสเตอร์ อาร์-ซีเอ็นเอ็นและ คูเปิลเน็ต (CoupleNet) เป็นต้น

สถาปัตยกรรมของอินเซพชันเรสเน็ตสอง [19, 67]

สจีกิตีและคณะ เผยแพร่ในปี ค.ศ. 2019 โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันอินเซพชันเรสเน็ตสอง ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากเรสเน็ตส์และใช้วิธีการไฮบริดโดยการรวมสถาปัตยกรรมอินเซพชันและเรสเน็ตซึ่งใช้ เรสิดวล คอนเนกชันเป็นทางเลือกแทนตัวกรองการต่อข้อมูล อินเซพชันเรสเน็ตสองประกอบด้วยเลเยอร์ลึก 164 ชั้นและพารามิเตอร์ประมาณ 55 ล้านพารามิเตอร์ อินเซพชันเรสเน็ตช่วยให้มีประสิทธิภาพด้านความแม่นยำที่ดีขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นลง โมเดลที่ใช้คอนโวลูชันอินเซพชันเรสเน็ตสอง ในการตรวจจับวัตถุเช่น ฟาสเตอร์ อาร์-ซีเอ็นเอ็น

รุ่น อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง

รุ่น อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง เป็นรุ่นที่เปลี่ยนแปลงจากรุ่น อินเซพชั่นสาม ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากเรสเน็ตส์บนเครือข่ายที่เหลือของไมโครซอฟท์มันทำให้ความลึกของเครือข่ายลึกขึ้นในขณะที่หลีกเลี่ยงปัญหาของการหายไปของเกรเดียนท์ (gradient disappearance) และ การระเบิดเกรเดียนท์ (gradient explosion) และปรับปรุงเครือข่ายผลงาน พลังการประมวลผลได้รับการปรับปรุง ความลึกของเครือข่ายเพิ่มขึ้นอีก และความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear) ของเครือข่ายจะเพิ่มขึ้นโดยการสลายตัวของคอนโวลูชันเคอร์เนล (convolutional kernel)

โมดูลการสกัดคัดแยกคุณลักษณะ (Feature extraction module) ในอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง ประกอบด้วย สามโมดูลที่คล้ายกัน: อินเซพชั่นเรสเน็ตเอ, อินเซพชั่นเรสเน็ตบีและอินเซพชั่นเรสเน็ตซี ชั้นแรกอธิบายสี่เหลี่ยมผืนผ้าในรูป จากซ้ายไปขวา สลับจากบนลงล่างด้านล่าง สำหรับขนาดคอนโวลูชันเคอร์เนล, คอนโวลูชันโอเพอร์เรตติ้งหรือ พูลลิ่งโอเพอร์เรตติ้ง (pooling operating), จำนวนช่อง ความยาวชั้น โดยทั่วไปถึง 1 มาร์ก, วี (V) หมายถึง ถูกต้อง (valid), ไม่เต็ม (not filling), เป็นค่าเริ่มต้น (the default) คือ ใส่ เซม (SAME) ผู้อ่านสามารถมองเห็นได้จากขนาดอินพุตและเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป ฟังก์ชันฟิวเตอร์ คอนแคท (filter concat) แสดงเป็น เทนเซอร์คอนเนกชัน (tensor connection) จำนวนช่องหลังจากนั้นคอนเนกชัน (connection) คือผลรวมของอดีต ในหมู่พวกอินเซพชั่นเรสเน็ตบี และอินเซพชั่นเรสเน็ตซี มีคอนโวลูชันไม่สมมาตร (asymmetric convolution) เคอร์เนล (kerns) ที่ 1 คูณ 7, 7 คูณ 1, 1 คูณ 3 และ 3 คูณ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนโวลูชันสมมาตร (symmetric convolution) เคอร์เนลของโมดูลอินเซพชั่นเรสเน็ตเอ เช่น การดำเนินการสามารถลดเวลาในการคำนวณระหว่างการดำเนินการของพารามิเตอร์และเพิ่มความลึกของเดปท์ (depth) และความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงของเครือข่ายได้ คุณลักษณะของกราฟถูกใช้งานตั้งแต่แรกเป็น กระบวนการแบบ นอร์มอลไลเซชัน และ ฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้เรกติไฟด์ (Relu activation function) หลังจากการเชื่อมต่อเทนเซอร์หลายชุดและ การคำนวณคอนโวลูชันและสุดท้ายจะได้ผลลัพธ์ของแต่ละโมดูลหลังจากผ่านโมดูลทั้งหมดแล้วผลลัพธ์จะถูกจำแนกตามเลเยอร์การเชื่อมต่อแบบเต็มและฟังก์ชันซอฟต์แวร์แม็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

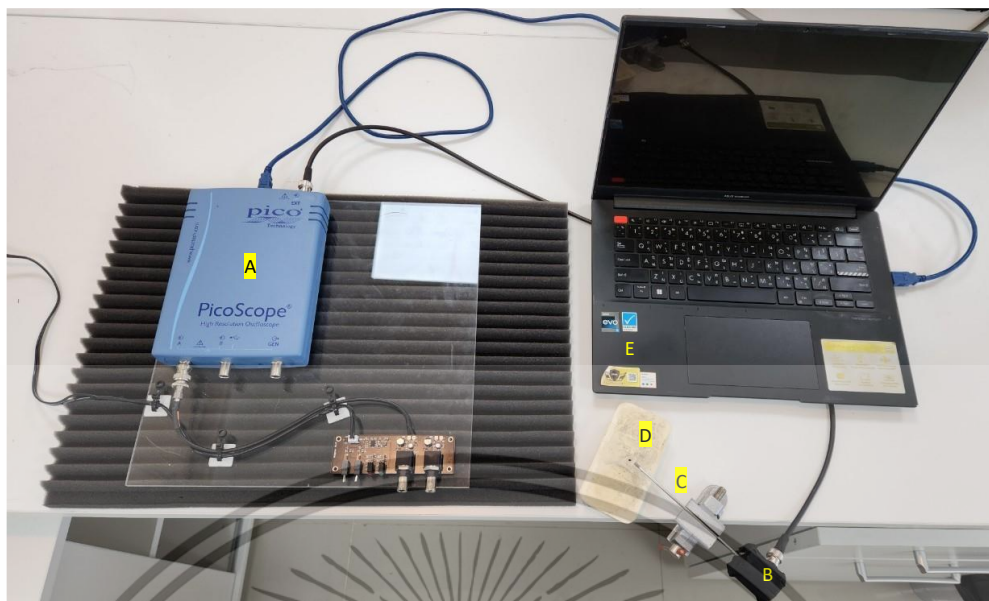
วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)

วิธีที่ใช้ดำเนินการวิจัยนี้เป็นการวิจัยแบบทดลอง ซึ่งในหัวข้อนี้ขอแบ่งหัวข้อออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ 1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย 2. ขั้นตอนการดำเนินการและการเก็บรวบรวมข้อมูล 3. กระบวนการนำอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึก อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง มาใช้ในการประมวลผลและวิเคราะห์สัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชชั่น ที่นำมาใช้ในการหาตำแหน่งการเกิดรอยร้าวบนครอบฟันเซอรโคเนียชนิดโมโนลิติกและเพื่อศึกษาและแยกคุณลักษณะของข้อมูลพื้นฐานลักษณะสัญญาณของคลื่นอะคูสติกกับตำแหน่งการร้าวบนครอบฟันเซอรโคเนียชนิดโมโนลิติก

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการวิจัย

1. เซนเซอร์อะคูสติกอิมิชชั่น รหัส บีหกเจ็ดศูนย์ (AE Sensor, AE B670) บริษัทชิงเฉิง กวางโจว ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน (QingCheng, AE Institute Co., Ltd, Guangzhou, China)
2. อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล พีโคสโคป รุ่น 4262 บริษัทพีโคเทค ประเทศอังกฤษ (PicoScope 4262 (Picotech, St Neots, UK))
3. เออี เวฟไกด์ (AE wave guide)
4. ครอบฟันหน้าชนิดโมโนลิติกเซอรโคเนีย (Monolithic zirconia anterior dental crown)
5. แหล่งกำเนิดซู นีลเสน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 (Hsu-Nielsen Source 0.5) ตามเอเอสทีเอ็ม อี976 (ASTM E976)
6. ไม้ดินสอ 2 เอช (2H)
7. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personnel Computer) โดยอุปกรณ์ทำการติดตั้งตามรูปที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





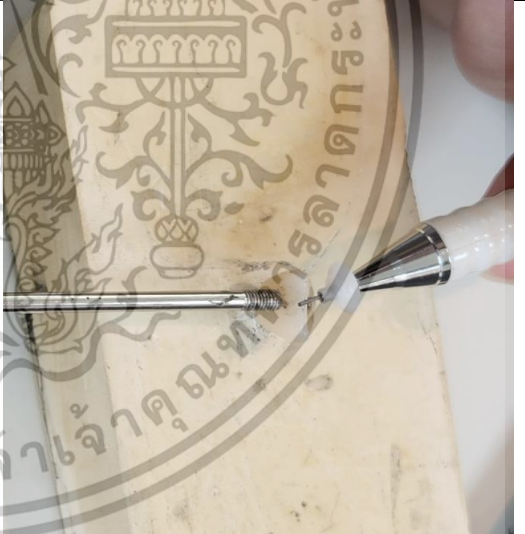

รูปที่ 12 อุปกรณ์ตรวจสอบอะคูสติกอิมพัลส์: (A) พิโคสโคป รุ่น 4262 (B) เซนเซอร์อะคูสติกอิมพัลส์รุ่น บีทเจ็ดศูนย์ (C) ท่อนำคลื่น (D) ครอบฟันชนิดโมโนลิติกเซอร์โคเนียและ (E) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการและการเก็บรวบรวม

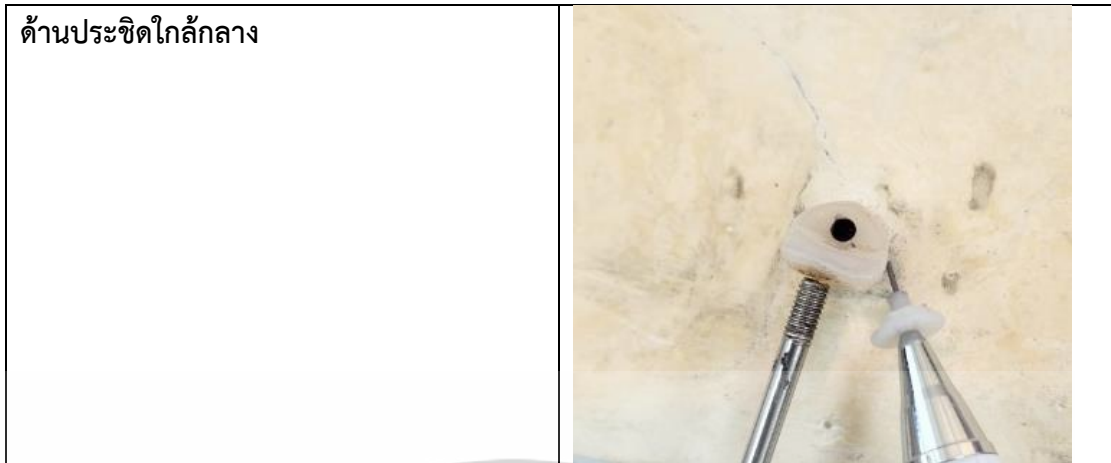
กระบวนการดำเนินการ มีดังนี้

1. ภายหลังจากการติดตั้งสถานีในการเก็บข้อมูลโดยการแบ่งด้านของฟันออกเป็น 5 ด้านตามรูปที่ 3
2. ทำการหักไส้ดินสอดูดด้วยดินสอกัด แห่ลงกำเนิดชู นิลเส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 อย่างระมัดระวังโดยความยาวของไส้ดินสอดูดอยู่ในช่วง 3-5 มิลลิเมตรบนครอบฟันทั้ง 5 ด้าน จำนวนด้านละ 500 ครั้ง ตามแสดงรูปที่ 13
3. ทำการเก็บสัญญาณเป็นซีเอสวีไฟล์ (.CSV file) นำสัญญาณมาทำการระบุตำแหน่ง (Label) ที่ทำการสร้างรอยร้าวจำลองทุกสัญญาณและทำการเปลี่ยนข้อมูลจากซีเอสวีไฟล์ (.CSV) เป็นภาพสัญญาณความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดและเวลาและทำการกำจัดเสียงรบกวนด้วยการกรองแบบเบย์เซียน
4. นำข้อมูลภาพสัญญาณความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดและเวลาที่ผ่านการกำจัดเสียงด้วยการกรองแบบเบย์เซียน มาทำการแปลงเป็นข้อมูลภาพสคาโลแกรม โดยการใช้ โปรแกรม แมทแลป 2023ปี ก่อนนำเข้าสู่สถาปัตยกรรมการเรียนรู้แบบจำลองอินเซพชันเรสเน็ตสอง ขั้นตอนตามรูปที่ 14
5. ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ข้อมูลสำหรับการฝึกฝนร้อยละ 80 และข้อมูลสำหรับการทดสอบร้อยละ 20
6. ทดสอบความถูกต้องของข้อมูล (Recall), ความแม่นยำของข้อมูล (Precision), ความถูกต้องรวมของโมเดลทุกคลาส (Total Accuracy) ระดับเอฟวัน (F1-Score) พื้นที่ใต้กราฟเอชซีในแต่ละคลาสตามขั้นตอนรูปที่ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งการหักไม้ดินสอบนกรอบฟัน	ภาพแสดงตำแหน่งการหักไม้ดินสอ
ด้านริมฝีปาก	
ด้านเพดาน	
ด้านปลายฟันตัด	
ด้านประชิดโกลกลาง	

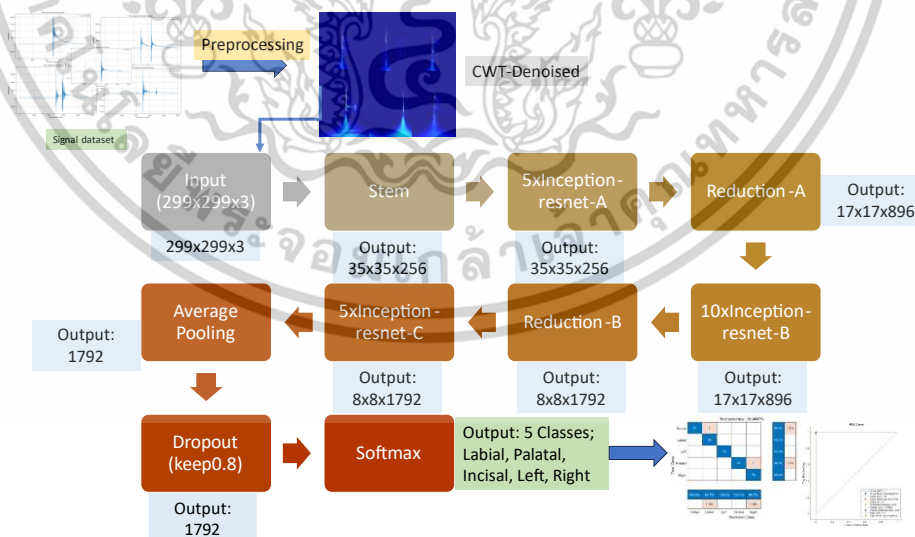
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 ภาพแสดงตำแหน่งการหักใส่ดินสอในแต่ละตำแหน่งบนครอบฟัน โดยแต่ละตำแหน่ง

3.3 การทดสอบอัลกอริทึม อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง

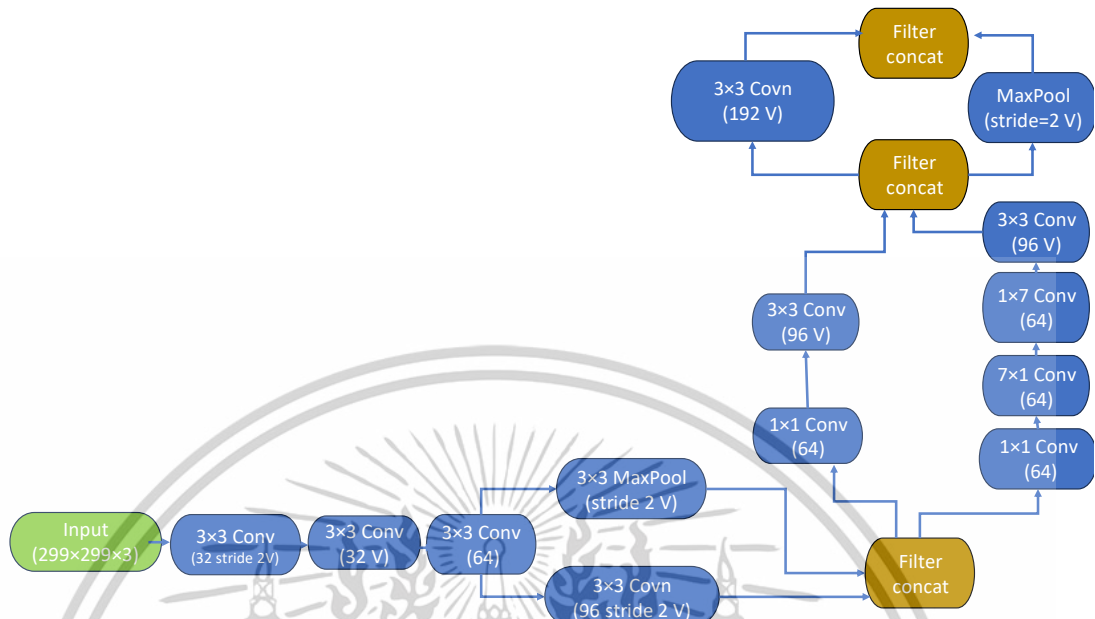
อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง [19] เป็น โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน มีความลึก 164เลเยอร์ซึ่งรวมสถาปัตยกรรมอินเซพชั่นเข้ากับการเชื่อมต่อที่เหลือ(residual connections) อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง รูปแบบหนึ่งของอินเซพชั่นสามโดยอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง ได้รับการฝึกอบรมเกี่ยวกับอิมเมจมากกว่าหนึ่งล้านอิมเมจจากฐานข้อมูล อิมเมจเน็ตในงานวิจัยนี้มี สถาปัตยกรรมที่มีการผสมผสานการใช้งานดังนี้



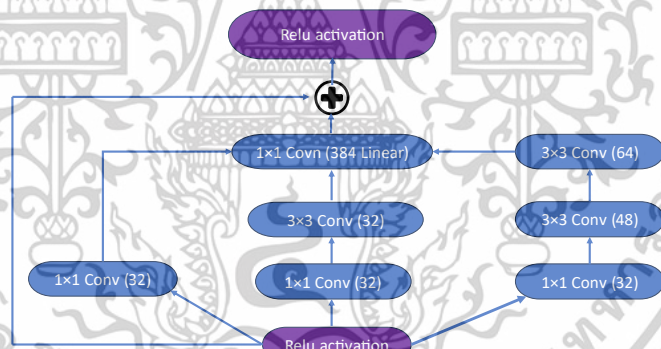
รูปที่ 14 แสดงภาพรวมขั้นตอนการดำเนินการผ่านโครงร่างสำหรับเครือข่าย อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

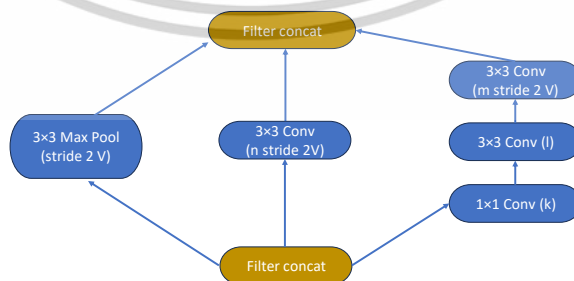
โดยโครงสร้างสำหรับเครือข่าย อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง ที่เราใช้ในงานวิจัยนี้และในแต่ละส่วนมีดังนี้



รูปที่ 15 โครงสร้างสเต็มของเครือข่ายอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง



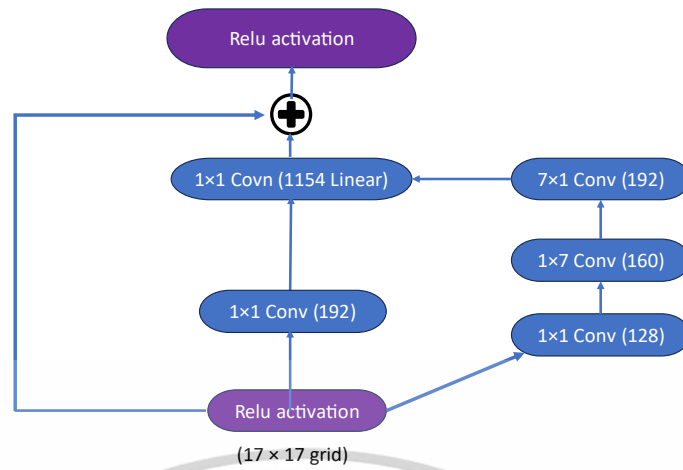
รูปที่ 16 โครงสร้างโมดูลอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง ขนาดกริด 35x35



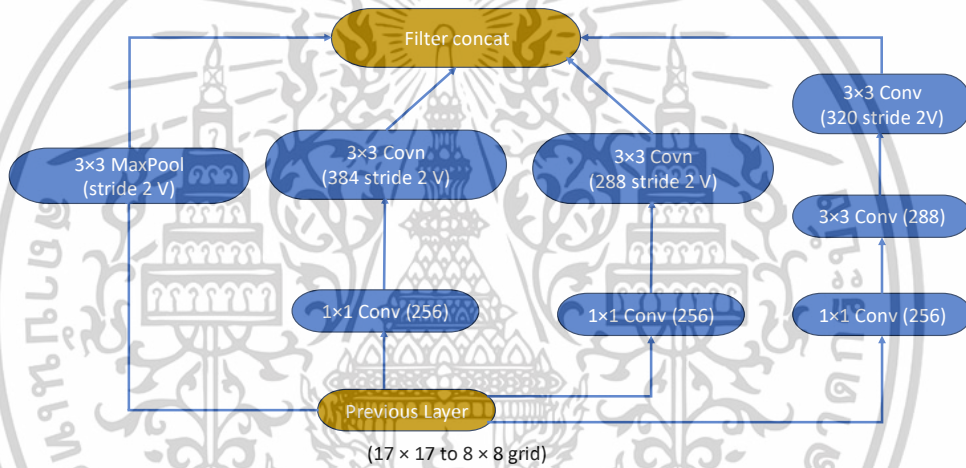
(35 x 35 to 17 x 17; k=256, l= 256, m=384, n=384)

รูปที่ 17 โครงสร้างโมดูลลดขนาดจากกริด 35x35 เป็น 17x17

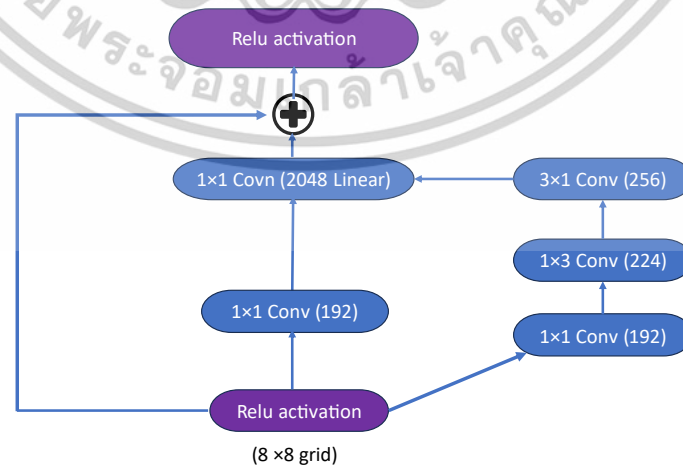
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 โครงสร้างโมดูลอินเซพชั่นเรสเน็ตพี ขนาดกริด 17x17



รูปที่ 19 โครงสร้างโมดูลรีดักชันบิลด์ขนาดจากกริด 17x17 เป็น 8x8



รูปที่ 20 โครงสร้างโมดูลอินเซพชั่นเรสเน็ตพี ขนาดกริด 8x8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเครือข่ายนี้รวมแนวคิดของสองเครือข่ายก่อนหน้านี้ ได้แก่ บล็อกของอินเซพชันและบล็อกของเรลิตวอล ผู้เขียนสถาปัตยกรรมนี้ ได้นำเสนอสองเวอร์ชัน ได้แก่ วี1 และ วี2 ซึ่งอินเซพชันเรสเน็ตสองเป็นเวอร์ชันที่กว้างขึ้นและคล้ายกับอินเซพชันสี่ แต่เพิ่มบล็อกของเรลิตวอลเข้ามา แสดงสถาปัตยกรรมสามมิติของเครือข่ายเวอร์ชันที่สองนี้ โดยประกอบด้วยบล็อกของอินเซพชันเรสเน็ต รูปที่ 16, 18 และ 20, บล็อกของรีดักชัน รูปที่ 17, 19 และบล็อกของสเต็ม รูปที่14 เพื่อปรับเครือข่ายคอนโวลูชันสองมิตินี้ให้เป็นแบบสามมิติ เราได้เปลี่ยนเลเยอร์คอนโวลูชันจากสองมิติเป็นสามมิติเปลี่ยนเลเยอร์การถัวเฉลี่ยแบบสองมิติ (Average Pooling) เป็นแบบสามมิติและเปลี่ยนเลเยอร์แมกซ์พูลลิ่ง (MaxPooling) จากสองมิติเป็นสามมิติเช่นกัน นอกจากนี้ เรายังใช้เวกเตอร์สามมิติ เป็นค่าสไทรด์ (stride) แทนค่าเวกเตอร์สองมิติและใช้ขนาดแกน (kernel size) แบบสามมิติแทนขนาดสองมิติ ขนาดอินพุตของสถาปัตยกรรมนี้เปลี่ยนเป็น $139 \times 139 \times 139 \times 3$ (RGB) แทนที่จะเป็น $299 \times 299 \times 3$ ดังนั้นผลลัพธ์ของบล็อกแต่ละตัวจะเป็นขนาด $15 \times 15 \times 15 \times 384$ สำหรับบล็อกของสเต็ม, $7 \times 7 \times 7 \times 1154$ สำหรับบล็อกของรีดักชัน เอ และ $3 \times 3 \times 3 \times 2048$ สำหรับบล็อกของรีดักชัน บี

ตารางที่ 1 แสดงถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทำการฝึกและการทดสอบ (training/testing)

ข้อมูลภาพสคาโลแกรม ทั้ง 5 ชุดข้อมูล

พารามิเตอร์	ค่า
Train/Test	80/20
Optimizer	Adam
Epoch	2000
Mini batch	32
Iteration per epoch	54
Initial Learning Rate	0.0001
Input size	$299 \times 299 \times 3$

การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ในการทดลองนี้ใช้ตัวชี้วัด 4 อย่างในการประเมินประสิทธิภาพของเครือข่าย ได้แก่ ความถูกต้องรวม (Total Accuracy), ความไว (Recall), ความแม่นยำ (Precision), และคะแนนเอฟ-วัน (F1 Score) โดยแบ่งสถานะต่าง ๆ ที่ได้จากผลการทดสอบรื้อรวดังนี้:

- True Positive (TP) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่เป็นรอยร้าวจริงและถูกจำแนกถูกต้องว่าเป็นรอยร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- True Negative (TN) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่ไม่ใช่รอยร้าวจริงและถูกจำแนกถูกต้องว่าไม่ใช่รอยร้าว
- False Positive (FP) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่ไม่ใช่รอยร้าวจริงแต่ถูกจำแนกผิดว่าเป็นรอยร้าว
- False Negative (FN) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่เป็นรอยร้าวจริงแต่ถูกจำแนกผิดว่าไม่ใช่รอยร้าว

ข้อมูลในชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็นร้อยละ 80 สำหรับการฝึกสอนและร้อยละ 20 สำหรับการทดสอบ ประสิทธิภาพของการจำแนกประเภทถูกประเมินโดยใช้ตัวชี้วัดดังนี้:

- ความไว (Recall/ Sensitivity) หมายถึงสัดส่วนของการทำนายที่ถูกต้องเมื่อเทียบกับจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่เป็นรอยร้าว
- ความแม่นยำ (Precision) หมายถึงสัดส่วนของตัวอย่างที่ทำนายว่าถูกต้องเมื่อเทียบกับจำนวนการทำนายทั้งหมดที่เป็นรอยร้าว
- ความถูกต้องรวม (Total Accuracy) หมายถึงสัดส่วนของตัวอย่างที่ถูกจำแนกถูกต้องเมื่อเทียบกับจำนวนตัวอย่างทั้งหมด
- คะแนนเอฟ-วัน (F1 Score) เป็นค่ากลางเชิงฮาร์โมนิกระหว่างความแม่นยำและความไว ซึ่งให้การประเมินความแม่นยำที่สมดุล

การประเมินประสิทธิภาพของระบบนี้ใช้ เมตริกซ์ความสับสนเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น ความแม่นยำและความไว โดยความไวคำนวณจากสมการ (2.3), ความแม่นยำคำนวณจากสมการ (2.4), และ คะแนนเอฟ-วันคำนวณจากสมการ (2.5)

$$Recall = \frac{TP}{FN + TP} \quad (2.3)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.4)$$

โดยที่ TP หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่ทำนายถูกว่าเป็นรอยร้าว (True Positive), FP หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่ทำนายผิดว่าเป็นรอยร้าว (False Positive), และ FN หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่ทำนายผิดว่าไม่ใช่รอยร้าว (False Negative)

$$F1 - score = 2 * \left(\frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \right) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล (ANALYSIS OF DATA)

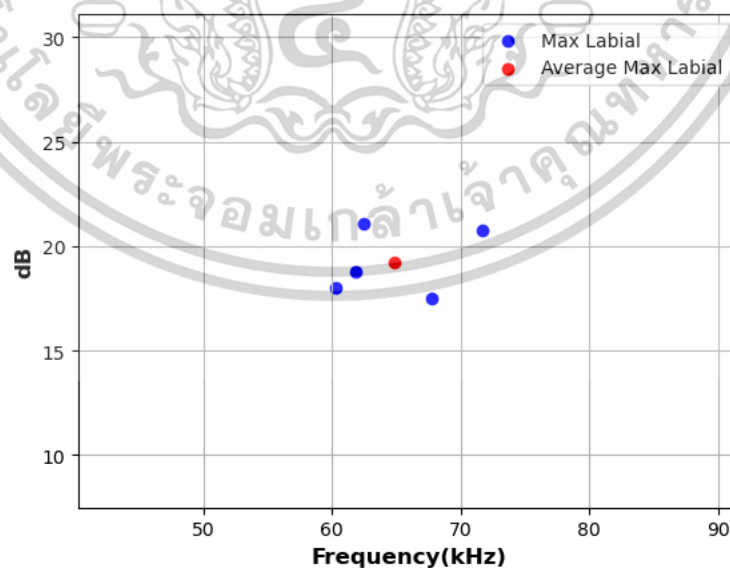
4.1 การเปรียบเทียบการปล่อยเสียงของสัญญาณ(AE sensor Amplitude Calibration)

ในการศึกษาการตรวจหาตำแหน่งของการแตกร้าวของวัสดุเซรามิกชนิดโมโนลิติกแบบไม่ทำลายโดยการจำลองการแตกร้าวโดยการหักใส่ดินสอชู่ นิลเส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี976 ได้ทำการเปรียบเทียบ (calibrate) ของการปล่อยเสียงของสัญญาณในแต่ละตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งมีการเก็บข้อมูลสัญญาณ 262,143 ค่าสัญญาณต่อ 1 หน่วยสัญญาณ โดยการจำลองการแตกร้าวแต่ละตำแหน่งมีดังนี้

4.1.1 การจำลองการแตกร้าวบริเวณด้านริมฝีปากของครอบฟัน

ตารางที่ 2 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านริมฝีปาก หน่วยเดซิเบล

เซนเซอร์	หักดินสอ ครั้งที่ 1	หักดินสอ ครั้งที่ 2	หักดินสอ ครั้งที่ 3	หักดินสอ ครั้งที่ 4	หักดินสอ ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
S/N						
B670	20.79	17.99	21.09	18.7	17.49	19.22



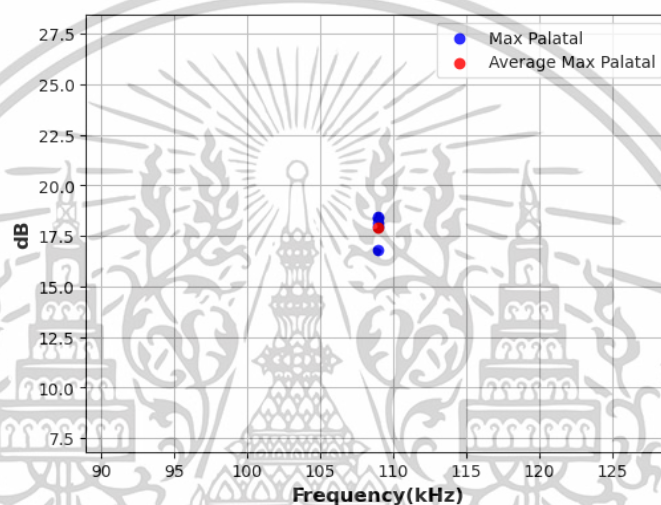
รูปที่ 21 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านริมฝีปากที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การจำลองการแตกร้าวบริเวณด้านเพดานของกรอบพื้น

ตารางที่ 3 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านเพดาน หน่วย เดซิเบล

เซนเซอร์	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	เฉลี่ย
S/N	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
B670	18.38	18.13	18.43	16.81	17.94	17.94



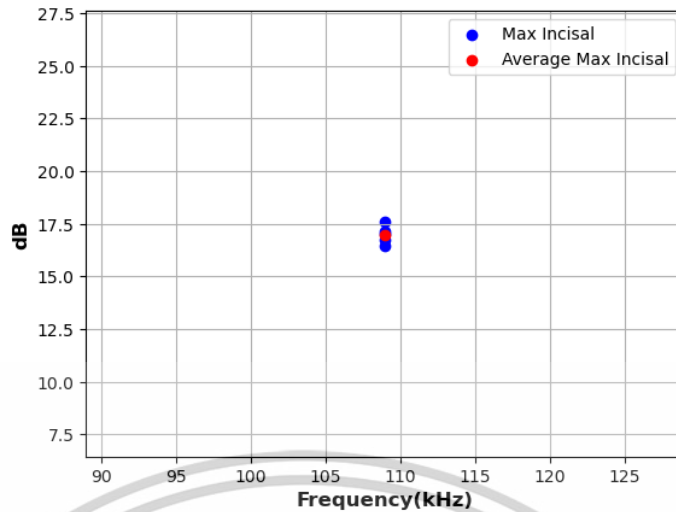
รูปที่ 22 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านเพดานที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)

4.1.3 การจำลองการแตกร้าวบริเวณด้านปลายตัดพื้นของกรอบพื้น

ตารางที่ 4 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านปลายตัดพื้น หน่วยเดซิเบล

เซนเซอร์	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	เฉลี่ย
S/N	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
B670	17.16	17.61	16.74	17.00	16.44	16.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

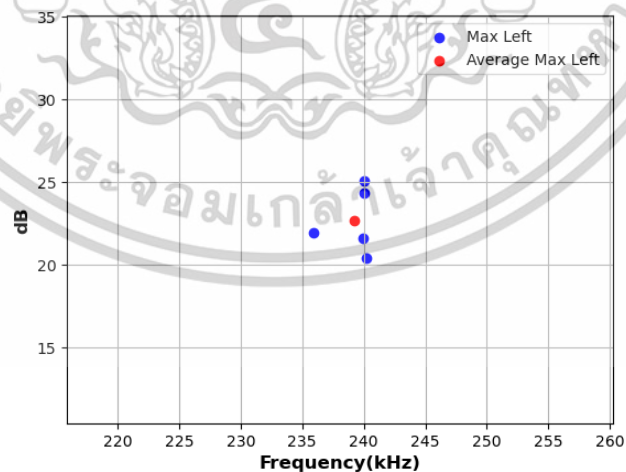


รูปที่ 23 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านปลายตัดฟันที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)

4.1.4 การจำลองการแตกร้าวบริเวณด้านซ้ายของครอบฟัน

ตารางที่ 5 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านซ้าย หน่วย เดซิเบล

เซนเซอร์	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	เฉลี่ย
S/N	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
B670	20.39	25.06	24.34	21.94	21.59	22.66



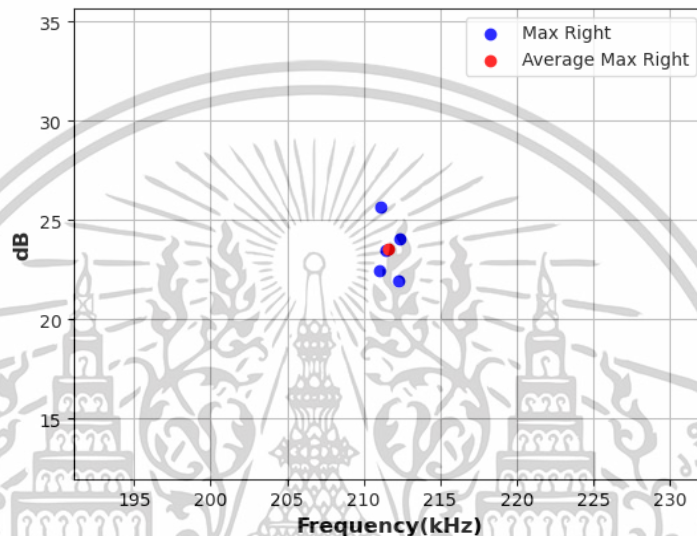
รูปที่ 24 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านซ้ายที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การจำลองการแตกร้าบริเวณด้านขวาของครอบฟัน

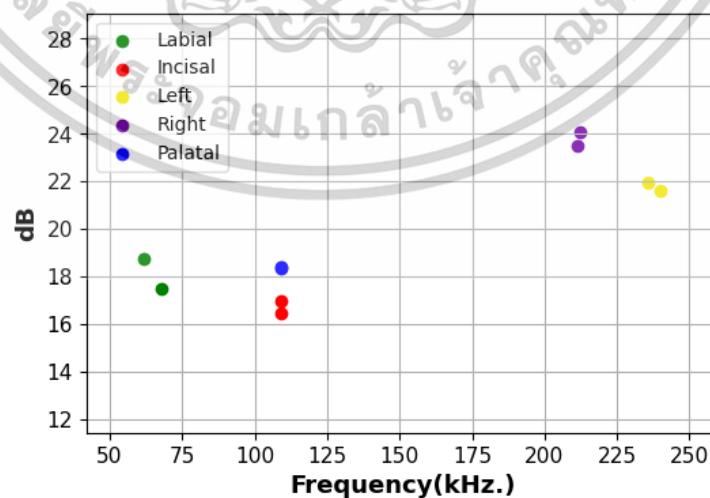
ตารางที่ 6 แสดงถึงแอมพลิจูดสูงสุดและแอมพลิจูดเฉลี่ยของคลาสด้านขวา หน่วยเดซิเบล

เซนเซอร์	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	หักดินสอ	เฉลี่ย
S/N	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
B670	23.47	21.97	24.06	25.64	22.49	23.53



รูปที่ 25 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของคลาสด้านขวาที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)

4.1.6 ภาพรวมการจำลองการแตกร้าแต่ละตำแหน่งบนครอบฟัน



รูปที่ 26 แอมพลิจูดสูงสุด (เดซิเบล) ของแต่ละคลาส ที่สัมพันธ์กับความถี่ (กิโลเฮิรซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

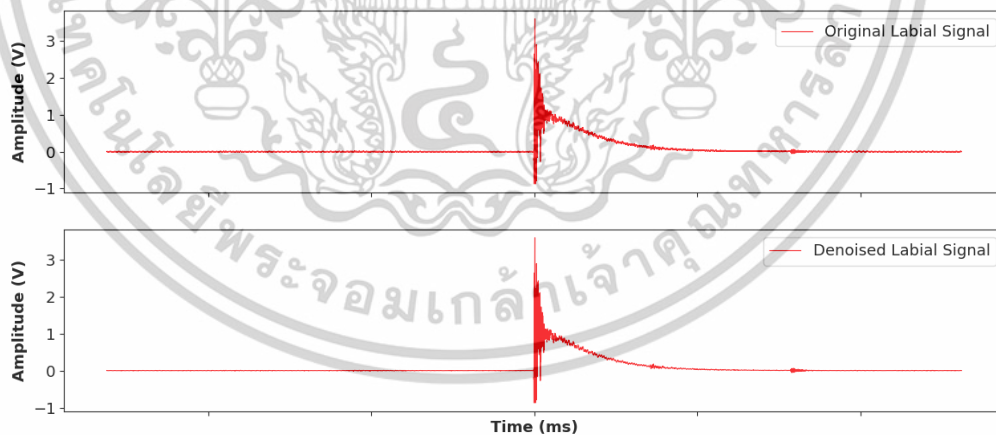
ซึ่งข้อมูลสัญญาณทั้งหมดอยู่ในช่วงการรับสัญญาณที่ 60-400 กิโลเฮิรซ์และมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังที่แสดงในรูปที่ 21 - 26

4.2 การกำจัดเสียงรบกวน (Denoised Preprocessing)

ในที่นี้ ได้ทำการกำจัดเสียงรบกวนโดยการใช้วิธีการกรองแบบเบย์เซียน (Bayesian) ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของลักษณะของตัวอย่างของสัญญาณในแต่ละคลาสดังรูปที่ 25 และได้ตั้งค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 6

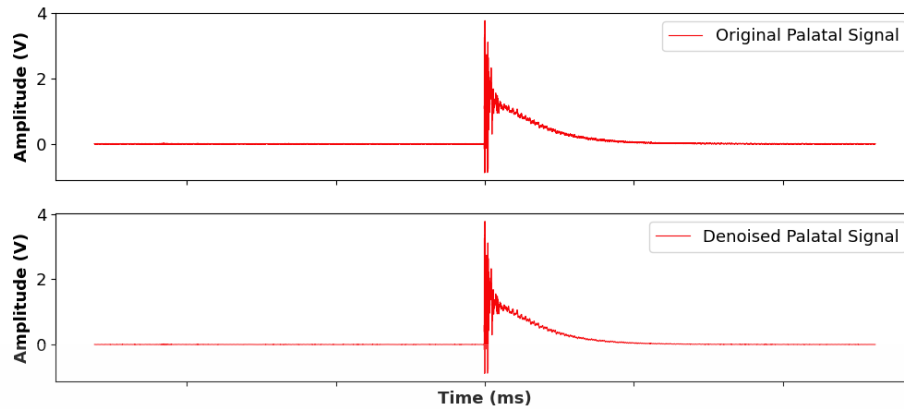
ตารางที่ 7 แสดงถึงส่วนของพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการทำการกำจัดเสียงรบกวน (Denoised)

พารามิเตอร์	ค่า
Level of Decomposition	8
The symmetric wavelet	sym4
Denoising Method	Bayesian
Threshold Rule	Median
Noise Estimate	Level Independent

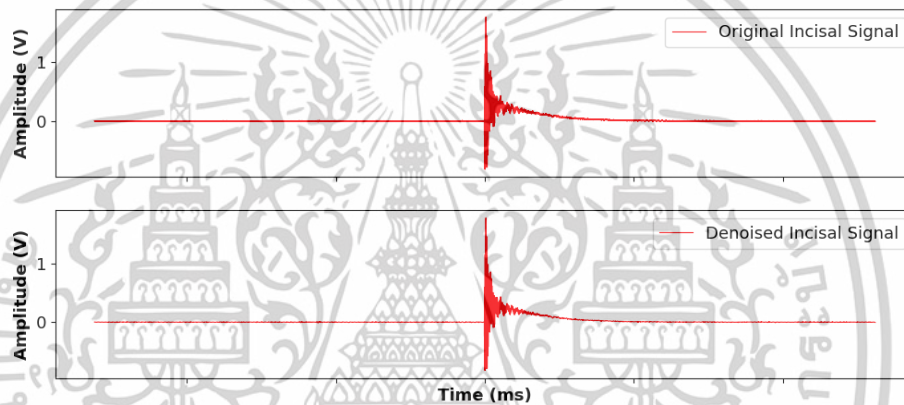


รูปที่ 27 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านริมฝีปาก

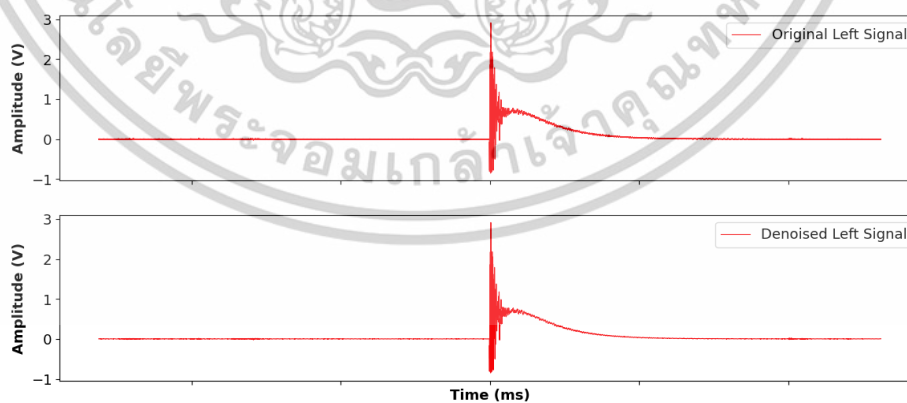
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 28 สัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านเพดาน

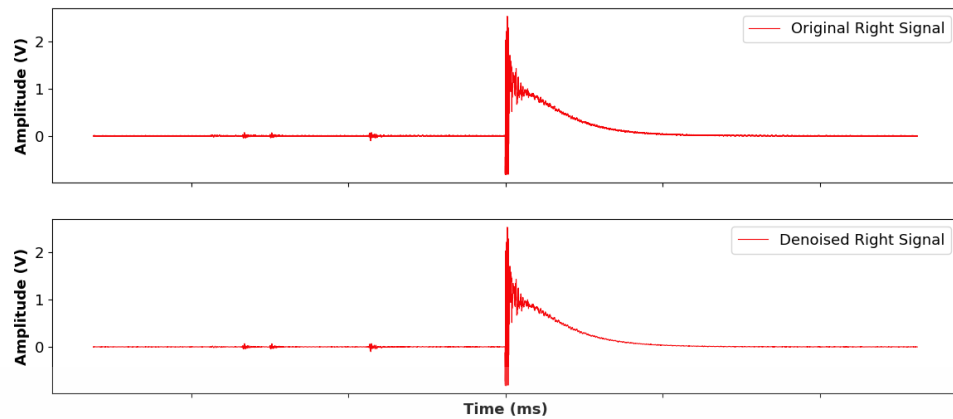


รูปที่ 29 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านปลายฟันตัด



รูปที่ 30 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนทางด้านประชิดไกลกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 แสดงสัญญาณต้นแบบและสัญญาณภายหลังจากการกรองแบบเบย์เซียนทางด้าน
ประชิดใกล้กลาง

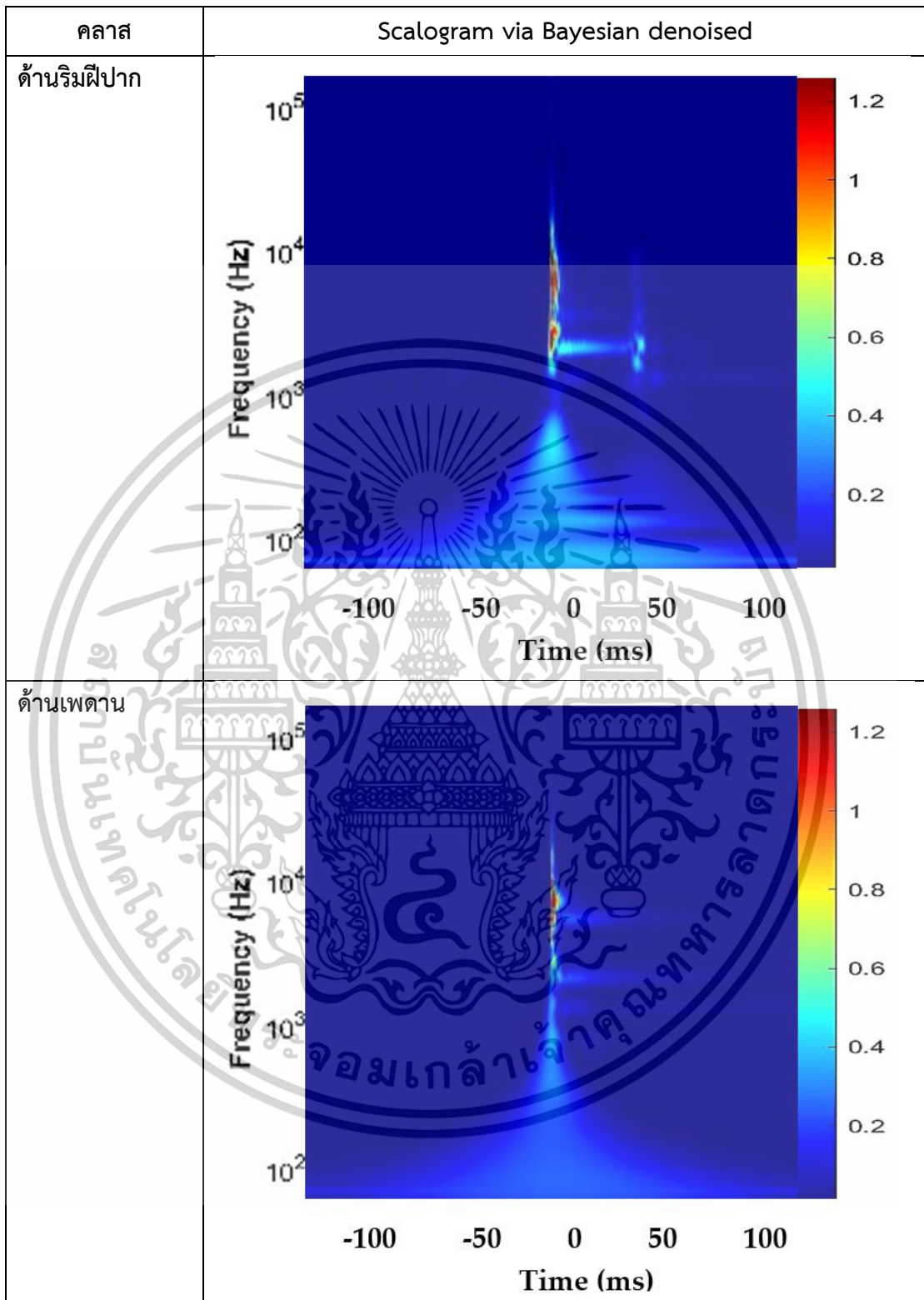
กราฟในกล่องด้านบนแสดงสัญญาณต้นแบบและกราฟในกล่องด้านล่างแสดงสัญญาณภาย
หลังจากการกรองแบบเบย์เซียนของแต่ละตำแหน่ง โดยลักษณะของเส้นสัญญาณนั้น ไม่มี
ลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ตามรูปที่ 27-31 ที่แสดงไว้

4.3 การแปลงข้อมูลเป็นเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

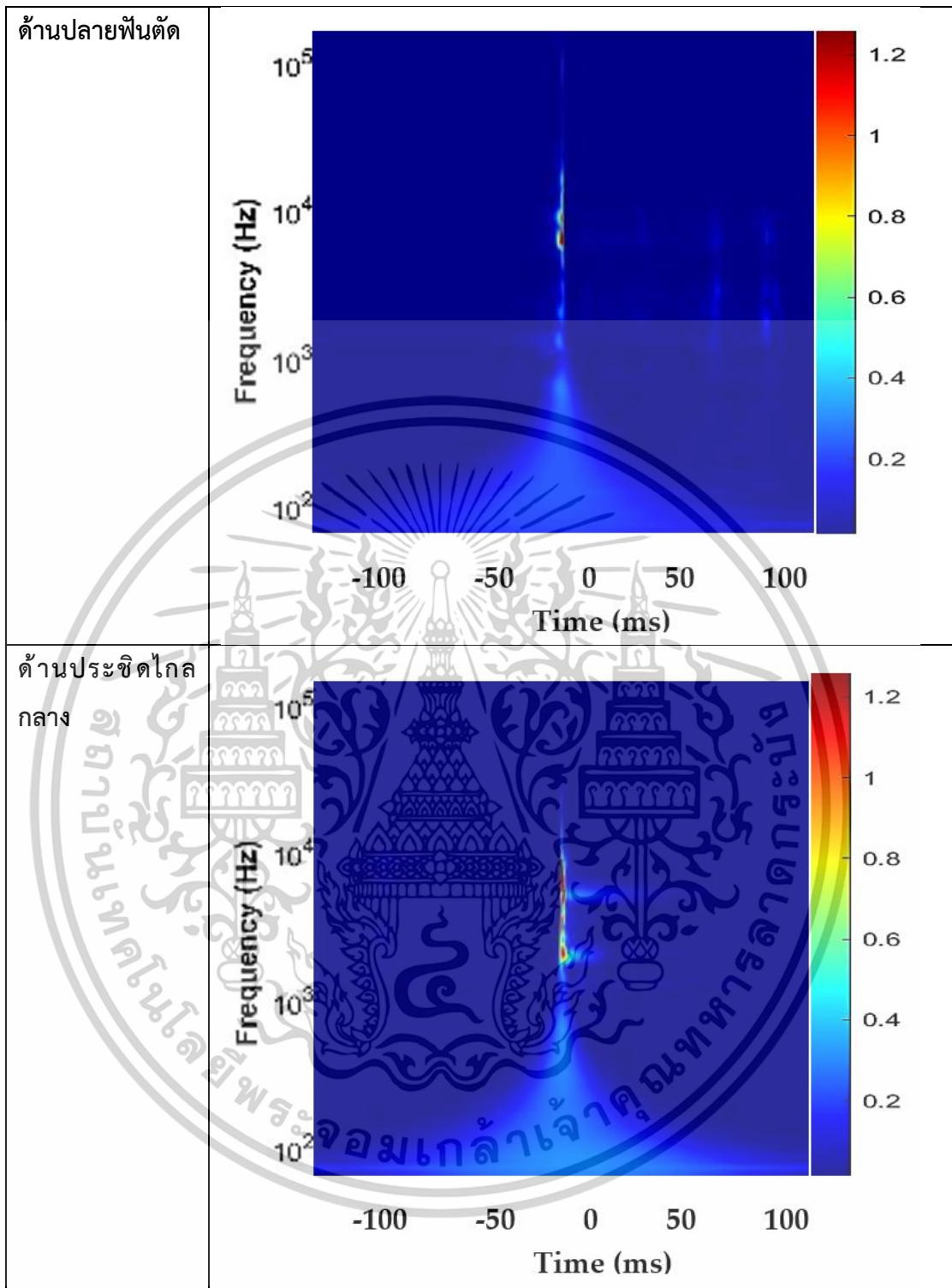
เพื่อศึกษาและแยกคุณลักษณะของข้อมูลพื้นฐานลักษณะสัญญาณของคลื่นอะคูสติกกับ
ตำแหน่งการร้าวบนกรอบพื้นเซอร์โคเนียชนิดโมโนลิติก ได้มีการปรับเปลี่ยนสัญญาณที่ผ่านการกำจัด
เสียงรบกวนในแต่ละตำแหน่งเป็นภาพสคาโลแกรมและภายหลังจากการทำการแปลงเวฟเล็ต
แบบต่อเนื่อง ดังตัวอย่างดังต่อไปนี้แล้วได้มาทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วน ส่วนสำหรับการฝึกฝน
ร้อยละ 80 และส่วนที่ใช้สำหรับการทดสอบร้อยละ 20 นำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ คือ ค่าน้ำหนัก
(weight, W) และ ค่าไบแอส (bias, B) ของชุดฝึก ไปใช้ในชุดทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้นำไปใช้สำหรับการ
ฝึกฝนและการทดสอบ จำแนกประเภทสัญญาณด้วยการเรียนรู้ ผ่านอัลกอริธึมอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง
ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

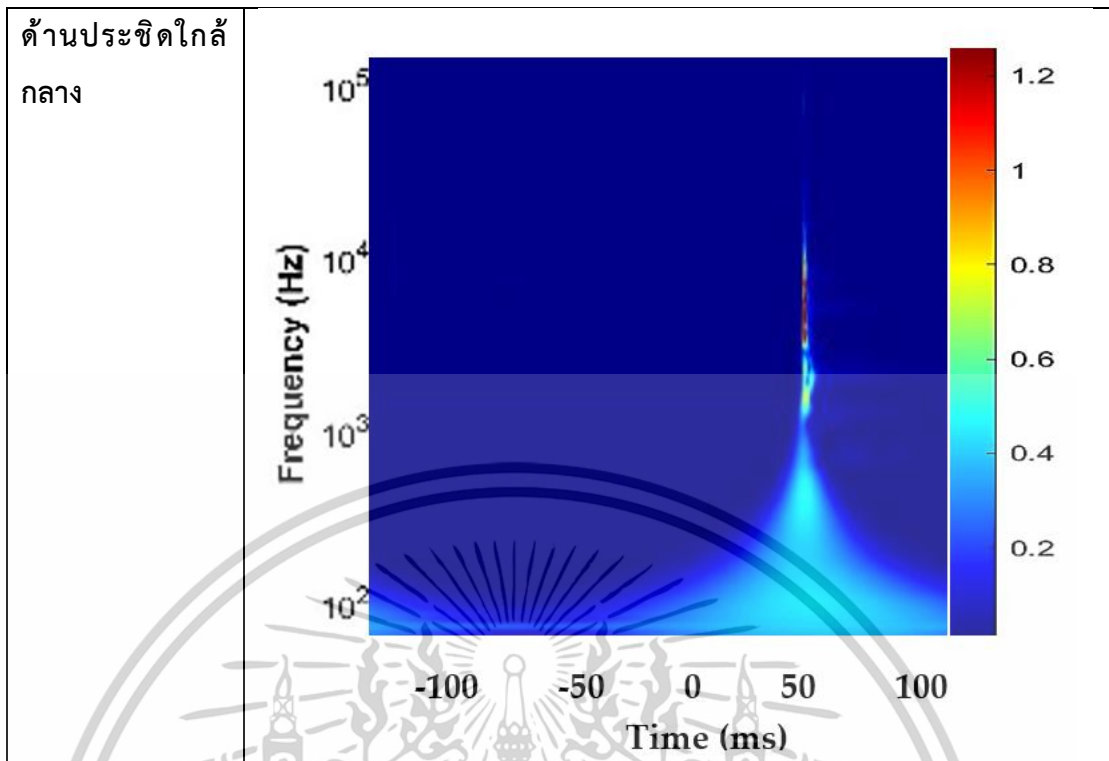
ตารางที่ 8 แสดงถึงลักษณะของภาพสคาโลแกรมที่ผ่านวิธีการกรองแบบเบย์เซียนในแต่ละคลาส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.4 ผลของการฝึกฝนผ่านอัลกอริธึมอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง

ตารางที่ 9 แสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆในอัลกอริธึมอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง

สถาปัตยกรรม	อินเซพชั่นเรสเน็ตสอง
2-D Global Average Pooling	2-D global average pooling
Dropout	20% dropout
Fully Connected	1000 fully connected layer
ReLU	ReLU
Fully Connected	5 fully connected layer
Softmax	softmax
Classification	Output

การทดสอบสำหรับข้อมูลสัญญาณอะคูสติกแปลงเป็นสัญญาณเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

มีการจัดข้อมูลฝึกสอนโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกด้วย ข้อมูลภาพสคาโลแกรม โดยทำการแบ่งข้อมูลในการฝึกสอนร้อยละ 80 ซึ่งเท่ากับ 2000 ข้อมูลภาพ และมีการเลือกข้อมูลสำหรับการทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 20 คือจำนวน 500 ข้อมูลภาพ โดยแต่ละคลาส มีข้อมูลอยู่ที่ 100 ข้อมูลภาพ โดย

ในการแยกแยะคุณลักษณะทำได้โดยการใช้ภาพสคาโลแกรมผ่านโมเดลอินเซพชั่นเรสเน็ตสองในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฝึกสอนและทดสอบ ซึ่งค่าความถูกต้องรวมในการจำแนกของชุดข้อมูลทดสอบได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.4 และมีเมตริกซ์ความสับสนของการจำแนกชุดข้อมูลทดสอบแสดงดังรูปที่ 32

Test accuracy : 99.4%

True Class	Incisal	97	1		1	1	97.0%	3.0%
	Labial		100				100.0%	
	Left			100			100.0%	
	Palatal				100		100.0%	
	Right					100	100.0%	

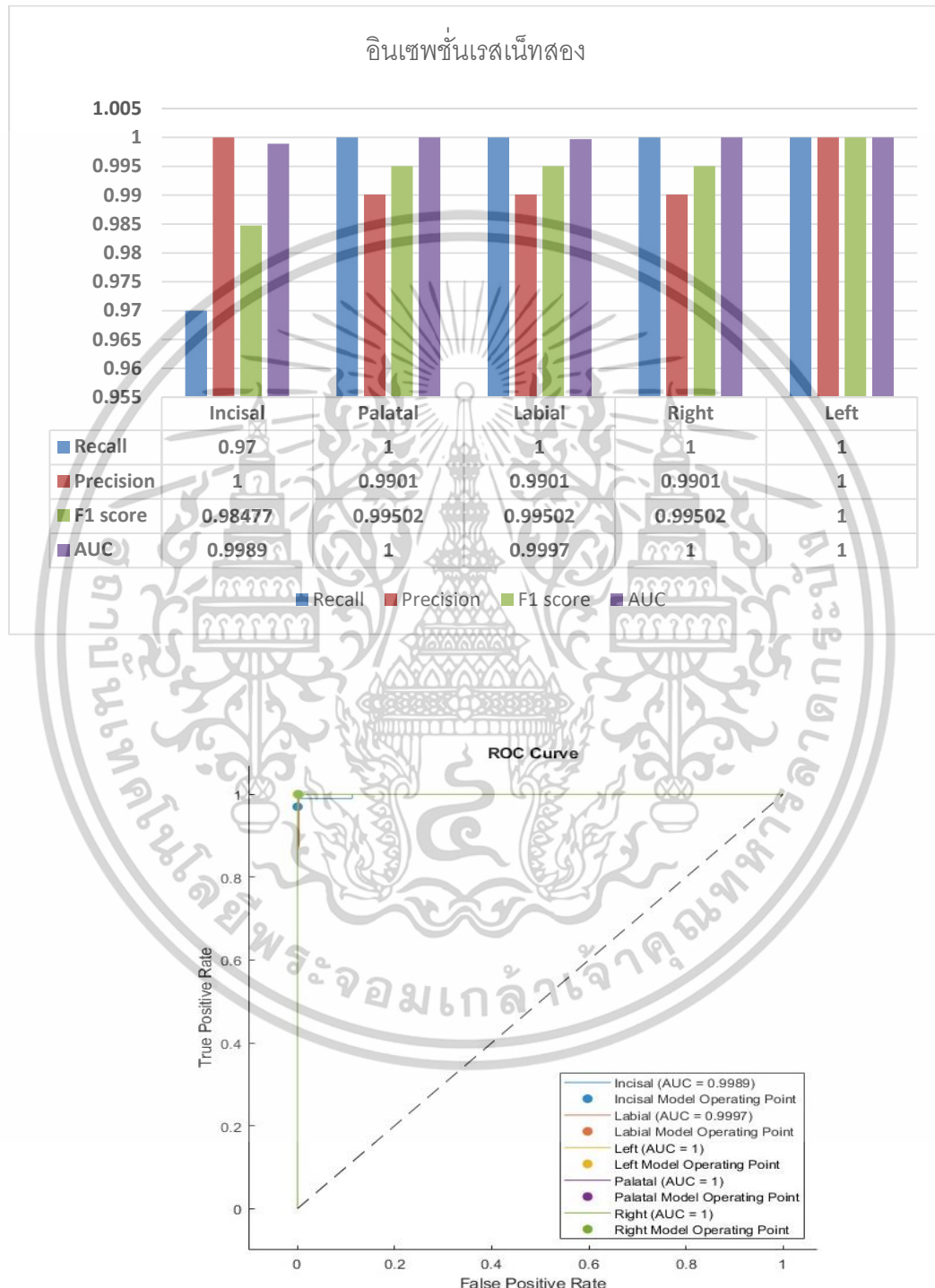
	100.0%	99.0%	100.0%	99.0%	99.0%
		1.0%		1.0%	1.0%
	Incisal	Labial	Left	Palatal	Right
	Predicted Class				

รูปที่ 32 แสดง เมตริกซ์ความสับสนสำหรับชุดข้อมูลทดสอบทั้ง 5 คลาส

ผลการทดสอบการจำแนกคลาสของข้อมูลด้วยอัลกอริธึมอินเซพชั่นเรสเน็ตสองภาพสคาโลแกรมทั้ง 5 ชุดข้อมูลถูกนำไปใช้เป็นอินพุต เพื่อทดสอบหา 1) ความแม่นยำ 2) ความไว 3) ระดับเอฟ-วัน 4) พื้นที่ใต้กราฟ อาร์โอซี ได้ดังตารางที่ 10 และรูปที่ 33 แสดงดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 แสดงตัวชี้วัดการตรวจจับที่ได้จากการประเมินสถาปัตยกรรมการจำแนกรูปภาพและการตรวจจับพื้นผิวรอยร้าวบนชุดทดสอบของชุดข้อมูลสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน-สัญญาณเวฟเลตแบบต่อเนื่องในแต่ละตำแหน่งบนฟัน



รูปที่ 33 แสดงกราฟอาร์โอซี (ROC curve)และพื้นที่ใต้กราฟอาร์โอซี (AUC) ในแต่ละคลาส ภายหลังการผ่านการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิจารณ์หรืออภิปรายผล (DISCUSSIONS)

5.1 หลักเกณฑ์ในการเลือกเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

การเลือกข้อมูล จากข้อมูลสัญญาณที่เก็บมาจากการจำลองการแตกร้าวนกรอบฟันเซอร์ โคนีเยชนิดโมโนลิติกนั้นโดยการหักของไส้ดินสอ 2เอช จากแหล่งกำเนิดชุนีลเส้น 0.5 นั้น ผู้วิจัยได้มีความระมัดระวังเป็นอย่างมากในการเก็บข้อมูลสัญญาณโดยพิจารณาจาก 2 หลักเกณฑ์ดังนี้

1. พิจารณาจากการหักไส้ดินสอแต่ละครั้ง ความถี่ (frequency) มีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่
2. พิจารณาจากกราฟสัญญาณที่เกิดขึ้น มีความกว้างครบรอบของคลื่นสัญญาณ 1รอบสัญญาณหรือไม่

หากข้อมูลสัญญาณได้ครบตามทั้ง 2 หลักเกณฑ์นี้ ถือว่าสัญญาณที่ได้นั้นครบสมบูรณ์นับเป็น 1 สัญญาณ

โดยแต่ละตำแหน่งมีการเก็บข้อมูลสัญญาณ 262,143 จุดสัญญาณต่อหนึ่งสัญญาณ

จำนวนจุดสัญญาณหรือ ขนาดของชุดข้อมูลมีผลอย่างมากต่อค่าประสิทธิภาพของโมเดล ซึ่งในงานวิจัยนี้ เรามีการวัดผลที่ค่าดังนี้ เช่น ความถูกต้องรวม, ความแม่นยำ, ความไว, และค่าระดับเอฟ-วัน โดยมีผลต่อแต่ละค่าดังนี้:

1. ความถูกต้องรวม
 - ขนาดชุดข้อมูลเล็ก: ความถูกต้องรวม อาจไม่สะท้อนผลลัพธ์ที่แท้จริง เนื่องจากโมเดลอาจเรียนรู้เฉพาะข้อมูลที่มีในชุดเล็กและอาจเกิดการจดจำเกินไป (overfitting) หรือไม่สามรถจับลักษณะที่สำคัญได้
 - ขนาดชุดข้อมูลใหญ่: ความถูกต้องรวม จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น เนื่องจากโมเดลมีข้อมูลหลากหลายมากพอที่จะเรียนรู้และจับลักษณะได้ครอบคลุมทุกคลาส
2. ค่าระดับเอฟ-วัน (เป็นค่าที่แสดงสมดุลระหว่างค่าความแม่นยำและค่าความไว)
 - ขนาดชุดข้อมูลเล็ก: ค่าระดับเอฟ-วัน อาจต่ำหากมีการจัดกลุ่มข้อมูลไม่สมดุลระหว่างคลาส หรือหากคลาสใดคลาสหนึ่งมีจำนวนมากกว่า อาจทำให้โมเดลทำงานได้ไม่ดีในคลาสที่มีจำนวนตัวอย่างน้อย
 - ขนาดชุดข้อมูลใหญ่: ค่าระดับเอฟ-วัน จะสะท้อนความสามารถของโมเดลได้ดีขึ้น เพราะมีข้อมูลเพียงพอในการจัดสมดุลระหว่าง ค่าความแม่นยำและค่าความไว โดยเฉพาะในกรณีที่ข้อมูลไม่สมดุล
3. ค่าความไว
 - ขนาดชุดข้อมูลเล็ก: ค่าความไว อาจต่ำ เนื่องจากโมเดลอาจพลาดการระบุข้อมูลที่ ตรง

ความจริงซึ่งเกิดจากการเรียนรู้จากชุดข้อมูลที่ไม่เพียงพอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขนาดชุดข้อมูลใหญ่: ค่าความไว จะสูงขึ้น หากมีข้อมูลมากพอที่จะครอบคลุมหลากหลายสถานการณ์ ทำให้โมเดลสามารถตรวจจับ ตรงความจริงได้มากขึ้น

4. ค่าความแม่นยำ (ความถูกต้องของข้อมูลที่โมเดลระบุว่าเป็น ข้อมูลที่ตรงความจริง)

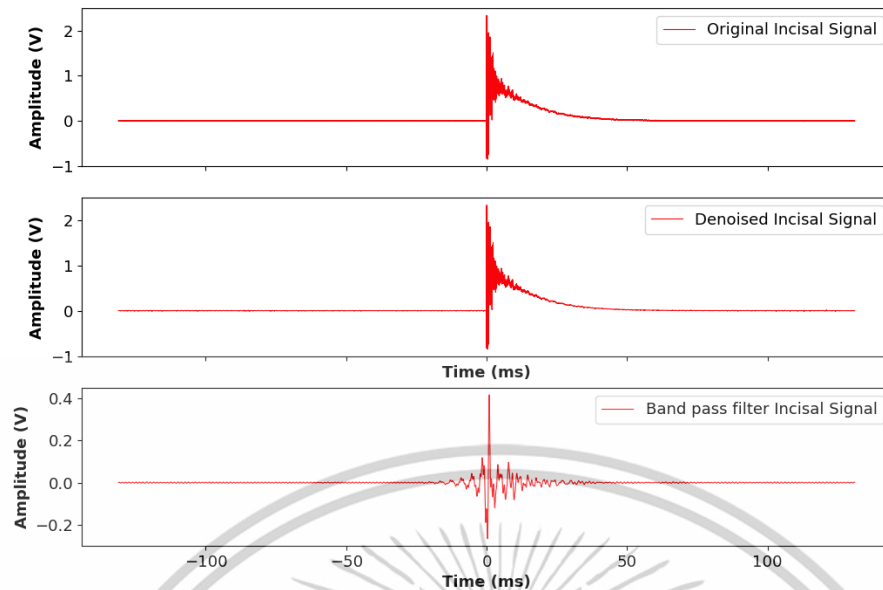
- ขนาดชุดข้อมูลเล็ก: ความแม่นยำ อาจต่ำหากโมเดลระบุข้อมูลที่ไม่ต้องถือว่าเป็น ข้อมูลที่ตรงความจริง เพราะโมเดลอาจยังไม่เข้าใจถึงลักษณะที่แท้จริง

- ขนาดชุดข้อมูลใหญ่: ความแม่นยำ จะสูงขึ้นเมื่อมีข้อมูลมากพอที่จะลดความผิดพลาดในการระบุผลลัพธ์เป็น ข้อมูลที่ตรงความจริง โดยไม่เกิดการไม่เป็นข้อมูลที่ตรงความจริงมากนัก ดังนั้น การมี จำนวนจุดสัญญาณมากพอจะช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้ได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่า ความถูกต้องรวม, ค่าระดับเอฟ-วัน, ค่าความแม่นยำ, และ ค่าความไว ดีขึ้น เพราะข้อมูลที่หลากหลายจะช่วยให้โมเดลทำความเข้าใจและทำนายผลได้แม่นยำมากขึ้น

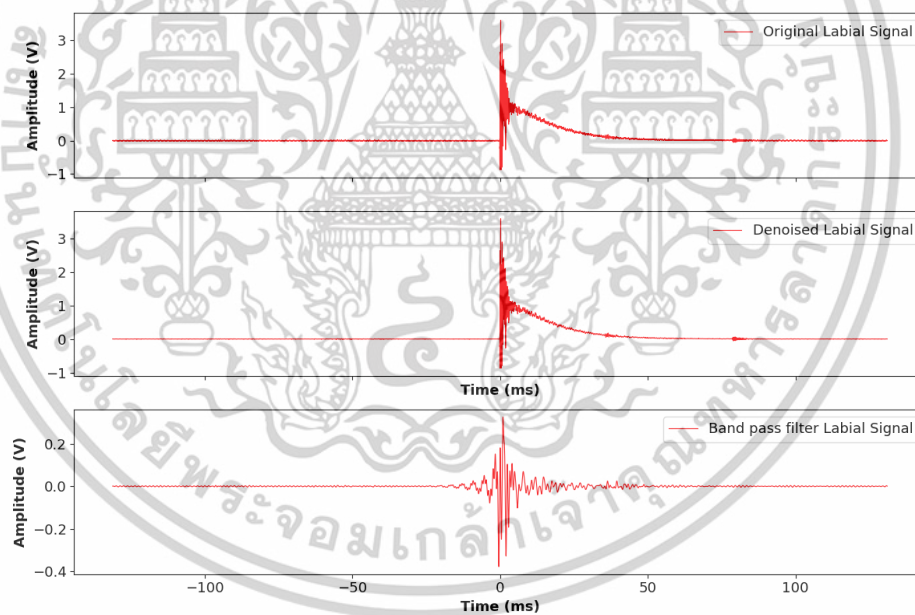
- แต่หากชุดข้อมูลมีขนาดเล็กเกินไป โมเดลอาจเกิดปัญหาการจดจำเกินไป หรือไม่สามารถทำงานได้ดีในสถานการณ์ที่ยังไม่เคยพบมาก่อน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ต่ำได้ และการทำนายผิดพลาด อาจเกิดเนื่องจาก สัญญาณการแตกรัวบริเวณที่ปลายฟันตั้นั้น เป็นบริเวณที่มีพื้นที่ในการเก็บสัญญาณเชื่อมต่อกับบริเวณอื่นอีก 4 บริเวณ เมื่อดูจากรูปที่ 3 และ 31 และจากการเก็บข้อมูลซึ่งมีการควบคุมการเก็บสัญญาณข้อมูลและการเก็บข้อมูลเป็นอย่างดีรวมถึงการเลือกใช้การประมวลผลผ่านอัลกอริธึมอินเซพชั่นเรสเน็ตสอง ที่สามารถแยกแยะข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูงได้เป็นอย่างดี ทำให้มีร้อยละของการทำนายผิดพลาดที่ค่อนข้างน้อยมาก

5.2 หลักเกณฑ์ในการพิจารณาการเลือกวิธีการกำจัดเสียงรบกวน

ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Preprocessing) นั้น มีการกำจัดเสียงรบกวนโดยในที่นี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ โดยใช้ 2 วิธีเพื่อดูความเหมาะสมในงานวิจัยนี้ก่อนนำข้อมูลไปทำการเข้าสู่โมเดลการฝึกและการทดสอบ

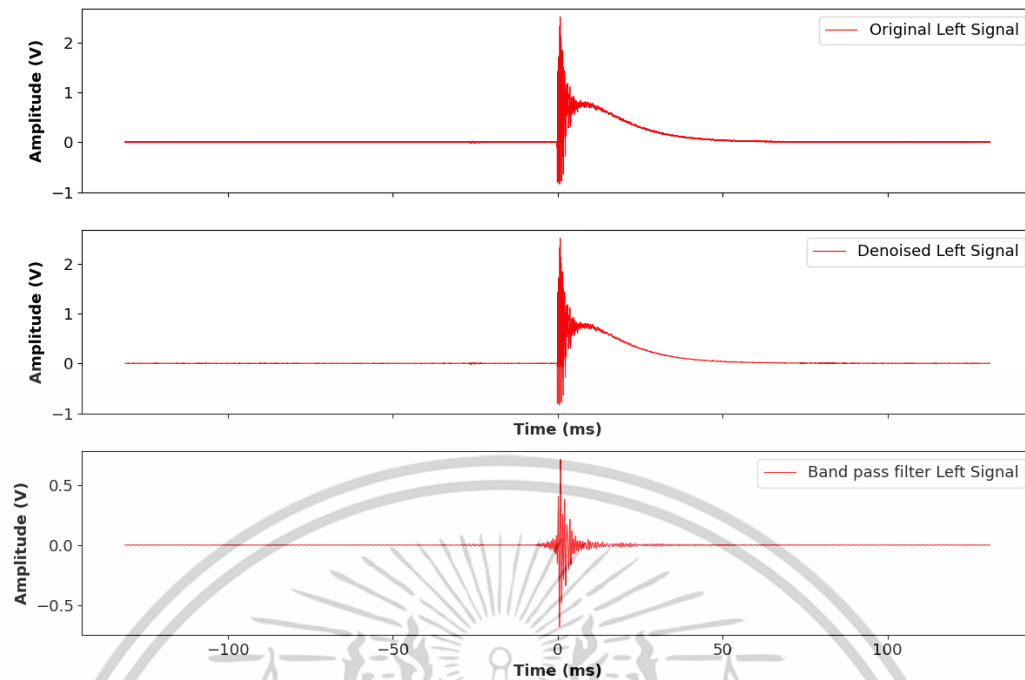


รูปที่ 34 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบเบย์เซียน และการกรองแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านปลายตัดฟัน

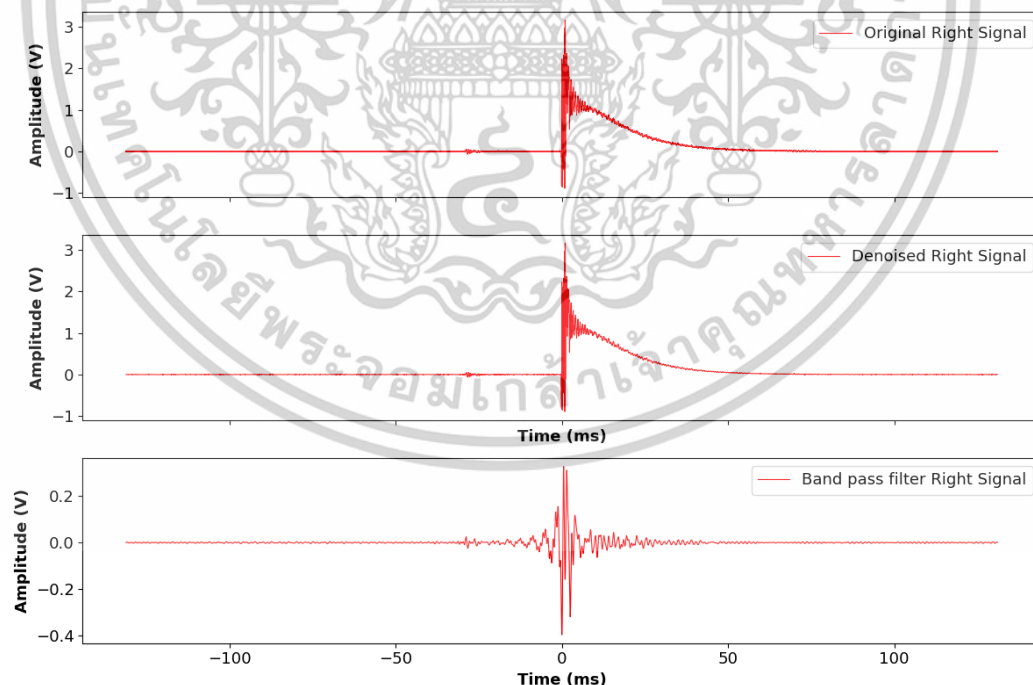


รูปที่ 35 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบเบย์เซียน และการกรองแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านริมฝีปาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

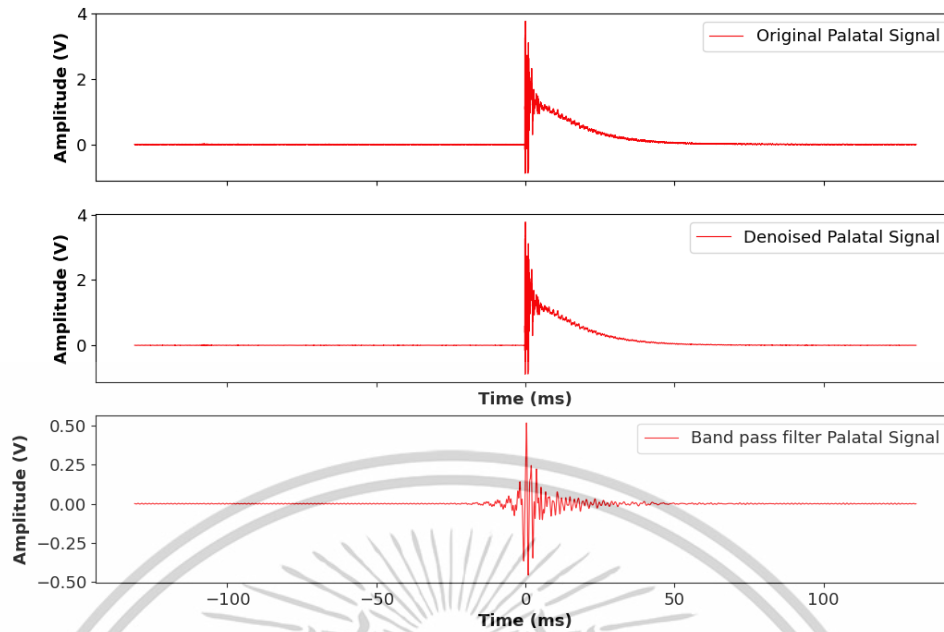


รูปที่ 36 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบเบย์เซียน และการกรองแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านประชิดไกลกลาง



รูปที่ 37 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบเบย์เซียน และการกรองแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านประชิดใกล้กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 38 แสดงข้อมูลสัญญาณที่เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเดิม สัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบเบย์เซียน และการกรองแบบแบนด์พาสของสัญญาณด้านเพดาน

โดยข้อมูลสัญญาณที่อยู่ในกล่องบนสุดเป็นสัญญาณพื้นฐาน สัญญาณในกล่องกลางเป็นสัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบเบย์เซียน และสัญญาณในกล่องล่างสุดเป็นสัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบแบนด์พาส

จากการพิจารณาสัญญาณในกล่องกลางในแต่ละด้านของพินั้นมีความใกล้เคียงและมีความสอดคล้องกับสัญญาณพื้นฐานมากกว่าสัญญาณในกล่องล่างสุด ดังนั้นสัญญาณในกล่องกลางซึ่งเป็นลักษณะของสัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบเบย์เซียน จะมีความเสถียรสูงขึ้นกว่าข้อมูลพื้นฐาน ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมากหากเลือกสัญญาณที่ผ่านกระบวนการการกรองแบบแบนด์พาสที่ทำให้เกิดความแตกต่างของสัญญาณที่มีอย่างมาก มีแนวโน้มที่จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการแยกแยะลักษณะของสัญญาณแต่ละคลาส

5.3 การเลือกการแปลงสัญญาณด้วยการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง

การแปลงสัญญาณจากสัญญาณหนึ่งมิติ เป็นภาพสคาโลแกรมสองมิติ เพื่อนำข้อมูลภาพที่ได้ไปทำการฝึกสอนและทดสอบต่อไป โดยภาพสคาโลแกรมคือ ค่าความเป็นสัมบูรณ์ของการแปลงสัญญาณแบบต่อเนื่องด้วยเวฟ ซึ่งแสดงผลในรูปของเวลาและความถี่ ภาพสคาโลแกรมนั้นมีประโยชน์มากกว่าภาพสเปกโตรแกรม ในการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นจริง โดยเฉพาะสัญญาณที่มีเหตุการณ์เกิดขึ้นในระดับต่างๆ เช่น สัญญาณที่มีเหตุการณ์ซ้ำสลับกับเหตุการณ์สั้นและเร็ว

5.3.1 ความแตกต่างระหว่างภาพสคาโลแกรมและภาพสเปกโตรแกรม

ภาพสเปกโตรแกรม ใช้การแบ่งสัญญาณด้วยหน้าต่าง (window) ที่มีขนาดคงที่ ซึ่งเลื่อนตามเวลาและความถี่ แต่ให้การแบ่งช่วงเวลาและความถี่ที่คงที่

การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง ใช้การย่อและขยายหน้าต่างหรือเวฟเลต ทำให้สามารถตรวจจับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระยะเวลานั้นๆ และความถี่สูงได้ดีและยังสามารถแยกเหตุการณ์ที่เกิดในช่วงเวลายาวและความถี่ต่ำได้ดีเช่นกัน

โดยขั้นตอนการคำนวณภาพสคาโลแกรม

1. หากสัญญาณมีจำนวนตัวอย่างมากกว่า 1 ล้าน จะทำการแบ่งสัญญาณออกเป็นช่วงๆ ที่มีการทับซ้อนกัน
2. คำนวณภาพสัญญาณการแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง ของแต่ละช่วงเพื่อหาผลลัพธ์ของภาพสคาโลแกรม
3. แสดงผล ภาพสคาโลแกรมทีละช่วง

ดังนั้นการเลือกใช้การแปลงสัญญาณเป็นภาพสคาโลแกรมซึ่งเป็นภาพสีอาร์จีบี (RGB) จึงถูกนำมาใช้ในการทำงานวิจัยนี้

5.4 การเลือกใช้อินเซพชันเรสเน็ตสอง

จากการพิจารณาจากการศึกษาความถูกต้องของข้อมูล ความถูกต้อง 5 อันดับสูงสุด จากรูปที่ 11 จึงพบว่าอินเซพชันเรสเน็ตสองเป็นเวอร์ชันไฮบริดที่ผสมผสานระหว่างโครงสร้างอินเซพชันและเรสเน็ต ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้นโดยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกภาพได้อย่างมาก แต่มีความต้องการทรัพยากรที่สูงกว่า ในการประมวลผลในขณะที่อินเซพชันสี่ เป็นโครงสร้างอินเซพชันแบบดั้งเดิมที่ไม่มีการเชื่อมโยงแบบเรลิตเวล แต่มีประสิทธิภาพในการจำแนกใกล้เคียงกับ อินเซพชันเรสเน็ตสอง [19]

เหตุผลในการเลือกใช้ อินเซพชันเรสเน็ตสอง

1. ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น: การผสมผสานระหว่าง อินเซพชัน และ เรสเน็ต ช่วยเพิ่มความสามารถในการเรียนรู้รูปแบบที่ซับซ้อนได้ดีกว่า ทำให้โมเดลมีความแม่นยำสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเชื่อมโยงแบบเรสิดวล: การใช้ การเชื่อมโยงแบบเรสิดวล ช่วยให้โมเดลเรียนรู้ได้เร็วขึ้นและแก้ปัญหาการสูญเสียมูลระหว่างการสอน (vanishing gradient problem) ทำให้การฝึกโมเดลมีเสถียรภาพมากขึ้น

ดังนั้น หากเป้าหมายคือความแม่นยำสูงสุดในงานที่ซับซ้อนอินเซพชั้นเรสเน็ทสอง จะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า แม้ว่าต้องแลกกับการใช้ทรัพยากรที่มากขึ้นก็ตาม ซึ่งการวิเคราะห์ตำแหน่งของการแตกตัวของแต่ละด้านของโครงสร้างของกรอบที่มีรูปร่างโค้งบนวัสดุ โมโนลิติกเซอร์โคเนีย ชนิดเดียวกันซึ่งแสดงถึงความซับซ้อนของข้อมูลอย่างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ (CONCLUSION)

การศึกษานี้ใช้ชุดข้อมูล 5 ชุดในการประเมินโมเดลโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน อินเซพชันเรสเน็ตสอง สำหรับการตรวจจับและระบุตำแหน่งรอยร้าวในโครงสร้างกรอบพินเซอร์โคเนียมแบบโมโนลิติก โดยชุดข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากข้อมูลสัญญาณเสียงอะคูสติกอิมิชันด้วยการหักของไส้ดินสอ (AE-PLB) และถูกแปลงเป็นภาพสัญญาณการแปลงสัญญาณแบบต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถตีความความแม่นยำของแต่ละโมเดลได้โดยตรง ผลการวิจัยสรุปว่าความแม่นยำสูงสามารถทำได้ด้วยจำนวนรอบ (epochs) ที่น้อยและจำนวนชั้นการคอนโวลูชันที่เหมาะสม โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของโมเดลให้เหมาะสม ระบบนี้สามารถพัฒนาให้เป็นเครื่องตรวจจับรอยร้าวแบบเรียลไทม์สำหรับพื้นผิวอื่นๆ ของโครงสร้างกรอบพินเซอร์โคเนียมแบบโมโนลิติกและสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน การตรวจจับรอยร้าวล่วงหน้าและการระบุทิศทางรอยร้าวอย่างอัตโนมัติมีความสำคัญในการทำนายสาเหตุของความล้มเหลว เช่น ความเครียดจากการดัดหรือแรงเฉือน ซึ่งเน้นย้ำถึงความสำคัญของการวินิจฉัยและการรักษาในช่วงเริ่มต้นเพื่อป้องกันการลุกลามของรอยร้าวจากการศึกษาและทำการแยกแยะข้อมูลสัญญาณเพื่อใช้ในการตรวจหาตำแหน่งของรอยร้าวบนกรอบพินเซอร์โคเนียมชนิดโมโนลิติกโดยการทดสอบการหักไส้ดินสอดำมาตรฐาน เอเอสทีเอ็ม อี979 งานวิจัยนี้พบว่า ผลของการทดสอบสัญญาณอะคูสติกกร่วมกับการใช้การเรียนรู้เชิงลึกแบบอินเซพชันเรสเน็ตสอง สามารถระบุตำแหน่งของการแตกร้าวของวัสดุเซอร์โคเนียมชนิดโมโนลิติกแบบไม่ทำลายได้อย่างดีโดยมีความถูกต้องรวมถึงร้อยละ 99.4 และงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและแยกคุณลักษณะของข้อมูลพื้นฐานลักษณะสัญญาณของคลื่นอะคูสติกกับ ตำแหน่งการร้าวบนกรอบพินเซอร์โคเนียมชนิดโมโนลิติกโดยในตำแหน่งริมฝีปากมี แอมพลิจูดเฉลี่ย อยู่ที่ 19.22 เดซิเบล ในตำแหน่งเพดาน มี แอมพลิจูดเฉลี่ย อยู่ที่ 17.94 เดซิเบล ในตำแหน่งปลายฟันตัดมี แอมพลิจูดเฉลี่ย อยู่ที่ 16.99 เดซิเบล ในตำแหน่ง ด้านประชิดไกลกลาง มีแอมพลิจูดเฉลี่ย อยู่ที่ 22.66 เดซิเบล ในตำแหน่งด้านประชิดใกล้กลาง มี แอมพลิจูดเฉลี่ย อยู่ที่ 23.53 เดซิเบล ที่ความถี่ที่แตกต่างกันและมีการแสดงภาพสคาโลแกรม ที่มีความแตกต่างกันในแต่ละคลาส ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้เห็นว่า ในการใช้สัญญาณอะคูสติกมาใช้ในการทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นยังไม่มีการทำโดยการจำลองการแตกร้าวจากการใช้แหล่งกำเนิดเสียงเทียมซึ่งเป็นการใช้การหักของไส้ดินสอซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมศาสตร์ภายใต้มาตรฐานเอเอสทีเอ็ม อี976 เพื่อการใช้ประโยชน์ในการใช้ในการตรวจสอบวัสดุกรอบพินเซอร์โคเนียมชนิดโมโนลิติกโดยมีความจำเป็นต้องทำการทดสอบในโมเดลฟันเพื่อออกแบบการวางอุปกรณ์ที่มีความเสถียร ในการรับข้อมูลสัญญาณและนำข้อมูลที่มาปรับปรุงเพื่อใช้ในการทำการทดสอบแบบเรียลไทม์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] L. Cartz, "Nondestructive testing," 1995.
- [2] A. Katunin, K. Dragan, and M. Dziendzikowski, "Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques," *Composite structures*, vol. 127, pp. 1-9, 2015.
- [3] B. Kamsu-Foguem, "Knowledge-based support in Non-Destructive Testing for health monitoring of aircraft structures," *Advanced engineering informatics*, vol. 26, no. 4, pp. 859-869, 2012.
- [4] H. Towsyfyhan, A. Biguri, R. Boardman, and T. Blumensath, "Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, no. 3, pp. 771-791, 2020.
- [5] T. P. Sattar, H. E. Leon-Rodriguez, and J. Shang, "Amphibious NDT robots," IntechOpen, 2007.
- [6] W. Suwansin and P. Phasukkit, "Deep learning-based acoustic emission scheme for nondestructive localization of cracks in train rails under a load," *Sensors*, vol. 21, no. 1, p. 272, 2021.
- [7] J. Wang, X. He, S. Faming, G. Lu, H. Cong, and Q. Jiang, "A real-time bridge crack detection method based on an improved inception-resnet-v2 structure," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 93209-93223, 2021.
- [8] J. Helal, M. Sofi, and P. Mendis, "Non-destructive testing of concrete: A review of methods," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 97-105, 2015.
- [9] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, and A. Soni, "Advances and researches on non destructive testing: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 3690-3698, 2018.
- [10] K. Tuntiwong, P. Phasukkit, and S. Tungjitkusolmun, "Deep Learning-Based Acoustic Emission Scheme for Nondestructive Localization of Cracks in Monolith Zirconia Dental crown under Load," in *2023 8th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed), 2023: IEEE*, pp. 1-4.
- [11] B. Yang, J. Guo, Q. Huang, Y. Heo, A. Fok, and Y. Wang, "Acoustic properties of interfacial debonding and their relationship with shrinkage stress in Class-I restorations," *Dental Materials*, vol. 32, no. 6, pp. 742-748, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] P. Szolovits, R. S. Patil, and W. B. Schwartz, "Artificial intelligence in medical diagnosis," *Annals of internal medicine*, vol. 108, no. 1, pp. 80-87, 1988.
- [13] A. Della Bona, O. E. Pecho, and R. Alessandretti, "Zirconia as a dental biomaterial," *Materials*, vol. 8, no. 8, pp. 4978-4991, 2015.
- [14] R. G. Luthardt, M. S. Holzhueter, H. Rudolph, V. Herold, and M. H. Walter, "CAD/CAM-machining effects on Y-TZP zirconia," *Dental Materials*, vol. 20, no. 7, pp. 655-662, 2004.
- [15] G. de Souza Melo *et al.*, "Association of sleep bruxism with ceramic restoration failure: A systematic review and meta-analysis," *The Journal of prosthetic dentistry*, vol. 119, no. 3, pp. 354-362, 2018.
- [16] H. Heller, D. Sreter, A. Arieli, I. Beililum, R. Pilo, and S. Levartovsky, "Survival and success rates of monolithic zirconia restorations supported by teeth and implants in bruxer versus non-bruxer patients: a retrospective study," *Materials*, vol. 15, no. 3, p. 833, 2022.
- [17] T.-H. Lan, C.-Y. Pan, P.-H. Liu, and M. M. Chou, "Fracture resistance of monolithic zirconia crowns in implant prostheses in patients with bruxism," *Materials*, vol. 12, no. 10, p. 1623, 2019.
- [18] J. Guo *et al.*, "A perspective on the diagnosis of cracked tooth: imaging modalities evolve to AI-based analysis," *Biomedical Engineering Online*, vol. 21, no. 1, p. 36, 2022.
- [19] C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke, and A. Alemi, "Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning," in *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, 2017, vol. 31, no. 1.
- [20] I. Goodfellow, *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
- [21] ASTM. "ASTM Standard E976-84(88): Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response." (accessed.)
- [22] A. ALShami, S. ALHarthi, M. Binshabaib, and M. Wahi, "Tooth morphology overview," in *Human Teeth-Key Skills and Clinical Illustrations: IntechOpen*, 2019.
- [23] R. S. Lacruz, S. Habelitz, J. T. Wright, and M. L. Paine, "Dental enamel formation and implications for oral health and disease," *Physiological reviews*, vol. 97, no. 3, pp. 939-993, 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] J. P. Simmer and J. C. C. Hu, "Dental enamel formation and its impact on clinical dentistry," *Journal of dental education*, vol. 65, no. 9, pp. 896-905, 2001.
- [25] C. P. Fernandes and O. Chevitarese, "The orientation and direction of rods in dental enamel," *The Journal of prosthetic dentistry*, vol. 65, no. 6, pp. 793-800, 1991.
- [26] A. Fincham, J. Moradian-Oldak, and J. Simmer, "The structural biology of the developing dental enamel matrix," *Journal of structural biology*, vol. 126, no. 3, pp. 270-299, 1999.
- [27] K. J. Chun, H. Choi, and J.-Y. Lee, "Comparison of mechanical property and role between enamel and dentin in the human teeth," *Journal of dental biomechanics*, vol. 5, 2014.
- [28] L. H. He and M. V. Swain, "Understanding the mechanical behaviour of human enamel from its structural and compositional characteristics," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 1, no. 1, pp. 18-29, 2008.
- [29] X. Li, J. Wang, A. Joiner, and J. Chang, "The remineralisation of enamel: a review of the literature," *Journal of dentistry*, vol. 42, pp. S12-S20, 2014.
- [30] G. W. Marshall Jr, "Dentin: microstructure and characterization," *Quintessence international*, vol. 24, no. 9, 1993.
- [31] D. H. Pashley, "Clinical correlations of dentin structure and function," *The Journal of prosthetic dentistry*, vol. 66, no. 6, pp. 777-781, 1991.
- [32] L. Angker, M. V. Swain, and N. Kilpatrick, "Micro-mechanical characterisation of the properties of primary tooth dentine," *Journal of dentistry*, vol. 31, no. 4, pp. 261-267, 2003.
- [33] L. Angker, M. V. Swain, and N. Kilpatrick, "Characterising the micro-mechanical behaviour of the carious dentine of primary teeth using nano-indentation," *Journal of Biomechanics*, vol. 38, no. 7, pp. 1535-1542, 2005.
- [34] J. Kinney, M. Balooch, S. Marshall, G. Marshall Jr, and T. Weihs, "Hardness and Young's modulus of human peritubular and intertubular dentine," *Archives of Oral Biology*, vol. 41, no. 1, pp. 9-13, 1996.
- [35] J. Kinney, M. Balooch, G. Marshall, and S. Marshall, "A micromechanics model of the elastic properties of human dentine," *Archives of oral Biology*, vol. 44, no. 10, pp. 813-822, 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] G. V. Black, *Descriptive anatomy of the human teeth*. SS White manufacturing Company, 1897.
- [37] A. Shenoy and N. Shenoy, "Dental ceramics: An update," *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, vol. 13, no. 4, pp. 195-203, 2010.
- [38] J. R. Kelly, "Dental ceramics: current thinking and trends," *Dental Clinics*, vol. 48, no. 2, pp. 513-530, 2004.
- [39] I. Denry and J. A. Holloway, "Ceramics for dental applications: a review," *Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 351-368, 2010.
- [40] G. W. Ho and J. P. Matinlinna, "Insights on ceramics as dental materials. Part I: ceramic material types in dentistry," *Silicon*, vol. 3, pp. 109-115, 2011.
- [41] Ö. Malkondu, N. Tinastepe, E. Akan, and E. Kazazoğlu, "An overview of monolithic zirconia in dentistry," *Biotechnology & biotechnological equipment*, vol. 30, no. 4, pp. 644-652, 2016.
- [42] A. D. Malallah and N. H. Hasan, "Classification and Generations of Dental Zirconia," in *Zirconia-New Advances, Structure, Fabrication and Applications*: IntechOpen, 2023.
- [43] G. Willmann, "The evolution of ceramics in total hip replacement," *Hip International*, vol. 10, no. 4, pp. 193-203, 2000.
- [44] C. Â. M. Volpato, L. Garbelotto, M. C. Fredel, and F. Bondioli, "Application of zirconia in dentistry: biological, mechanical and optical considerations," *Advances in ceramics-electric and magnetic ceramics, bioceramics, ceramics and environment*, vol. 25, no. 17, pp. 397-420, 2011.
- [45] I. Denry and J. R. Kelly, "State of the art of zirconia for dental applications," *Dental materials*, vol. 24, no. 3, pp. 299-307, 2008.
- [46] J. Grech and E. Antunes, "Zirconia in dental prosthetics: A literature review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4956-4964, 2019.
- [47] M. Yoshimura, "Phase stability of zirconia," *Am. Ceram. Soc. Bull.:(United States)*, vol. 67, no. 12, 1988.
- [48] G. K. Bansal and A. Heuer, "On a martensitic phase transformation in zirconia (ZrO₂)—I. Metallographic evidence," *Acta Metallurgica*, vol. 20, no. 11, pp. 1281-1289, 1972.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] B. Stawarczyk, C. Keul, M. Eichberger, D. Figge, D. Edelhoff, and N. Lümke mann, "Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I," *Quintessence international*, vol. 48, no. 5, 2017.
- [50] B. Stawarczyk, C. Keul, M. Eichberger, D. Figge, D. Edelhoff, and N. Lümke mann, "Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part II," *Quintessence International*, vol. 48, no. 6, 2017.
- [51] Y. Zhang, I. Sailer, and B. R. Lawn, "Fatigue of dental ceramics," *Journal of dentistry*, vol. 41, no. 12, pp. 1135-1147, 2013.
- [52] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic testing of materials*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [53] W. P. Rogers, "Elastic property measurement using Rayleigh-Lamb waves," *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 6, no. 4, pp. 185-208, 1995.
- [54] I. Solodov, J. Bai, S. Bekgulyan, and G. Busse, "A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation," *Applied Physics Letters*, vol. 99, no. 21, 2011.
- [55] C. Pei, T. Fukuchi, H. Zhu, K. Koyama, K. Demachi, and M. Uesaka, "A study of internal defect testing with the laser-EMAT ultrasonic method," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 59, no. 12, pp. 2702-2708, 2012.
- [56] Z.-l. Zhou, J. Zhou, L.-j. Dong, X. Cai, Y.-c. Rui, and C.-t. Ke, "Experimental study on the location of an acoustic emission source considering refraction in different media," *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 7472, 2017.
- [57] M. V. Felice and Z. Fan, "Sizing of flaws using ultrasonic bulk wave testing: A review," *Ultrasonics*, vol. 88, pp. 26-42, 2018.
- [58] C. B. Scruby, "An introduction to acoustic emission," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 20, no. 8, p. 946, 1987.
- [59] A. Terchi and Y. Au, "Acoustic emission signal processing," *Measurement and Control*, vol. 34, no. 8, pp. 240-244, 2001.
- [60] A. Grossmann, R. Kronland-Martinet, and J. Morlet, "Reading and understanding continuous wavelet transforms," in *Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space Proceedings of the International Conference, Marseille, France, December 14-18, 1987*, 1990: Springer, pp. 2-20.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [61] L. Alzubaidi *et al.*, "Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions," *Journal of big Data*, vol. 8, pp. 1-74, 2021.
- [62] S. Bianco, R. Cadene, L. Celona, and P. Napoletano, "Benchmark analysis of representative deep neural network architectures," *IEEE access*, vol. 6, pp. 64270-64277, 2018.
- [63] M. Z. Alom *et al.*, "The history began from alexnet: A comprehensive survey on deep learning approaches," *arXiv preprint arXiv:1803.01164*, 2018.
- [64] D. Theckedath and R. Sedamkar, "Detecting affect states using VGG16, ResNet50 and SE-ResNet50 networks," *SN Computer Science*, vol. 1, no. 2, p. 79, 2020.
- [65] D. Bhatt *et al.*, "CNN variants for computer vision: History, architecture, application, challenges and future scope," *Electronics*, vol. 10, no. 20, p. 2470, 2021.
- [66] W. Xu, Y.-L. Fu, and D. Zhu, "ResNet and its application to medical image processing: Research progress and challenges," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 240, p. 107660, 2023.
- [67] F. Baldassarre, D. G. Morín, and L. Rodés-Guirao, "Deep koalarization: Image colorization using cnns and inception-resnet-v2," *arXiv preprint arXiv:1712.03400*, 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว กุศล ตันติวงส์
วัน เดือน ปีเกิด	6 ตุลาคม 2522 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	2/90 หมู่บ้านมนตรีเกียรติฯ ท่าแร่ บางเขน กรุงเทพฯ 10220
ประวัติการศึกษา:	
2545	ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2550	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาศัลยศาสตร์ช่องปากและแม็กซิลโลเฟเชียล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2562	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมจัดฟัน China Medical University, Taiwan
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:	
2563 – ปัจจุบัน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
2562	ผู้อำนวยการหลักสูตรปริญญาโท คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น
2555 – 2560	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น
2555	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาศัลยศาสตร์ช่องปากและแม็กซิลโลเฟเชียล คณะ ทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
2550 – 2554	อาจารย์สาขาศัลยศาสตร์ช่องปากและแม็กซิลโลเฟเชียล คณะทันต แพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
2545 – 2550	ทันตแพทย์ รพ.รัฐบาล และรพ. เอกชน

ผลงานวิจัย :

Tuntiwong K., Sessirisombat S., Jansisyanont P., The Influence of Tranexamic Acid for Controlling Blood Loss in Orthognathic Surgery, Journal of the Dental Association of Thailand, Volume 57 Number 4 July – August 2007pp.199-205

Tuntiwong K., Kiatmanakul K., Myeloid sarcoma of the jaw bone: a case report, International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery, Volume 38 May 2009. (Abstract)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rungtragoolchai N., Pratumthong A., Tuntiwong K., Occlusal Splint-like Device for protecting Osteoradionecrosis of Jaws, 25th IADR-SEA Division Annual Scientific Meeting 2011, October 2011. (Abstract)

Tuntiwong K., An expert autogenous tooth transplantation: review of biologic basis, clinical procedures, and outcomes, Thai Journal Oral Maxillofacial Surgery, Jan-Jun 2012.

Dentoalveolar injuries, Basic Plastic Surgery, Thammasat University Copyright 2013.

Tuntiwong K., Patchanee S., Wattanachaiyasit S., Kaewbunperm U., Comparison the Property of Tungsten and Lead for Protection Against Radiotherapy In different thickness and position as shielding materials, Asian Journal of Medical Research, Volume 6 Number 4 Oct- Dec 2017. (8-10)

Tuntiwong K., Yu J H., The best position of orthodontic miniimplant in translation for canine retraction, TAO forum 2018. (Abstract)

Tuntiwong K., Yu J H., Comparison of In Vitro Dose Perturbation Effects of Amalgam, Composite Resin, Glass Ionomer Cement and Ketac silver During Head and Neck Radiation with Photon Beam, DOBCR, 3(2) 2020, pp.1-4

Sritart H., Tuntiwong K., Miyazaki H., Taertulakarn S., Disparities in Healthcare services and Spatial Assessments of Mobile Health Clinics in the Border Regions of Thailand, Int. J. Environ. Res. Public Health, 18(2021)

Tuntiwong K., Hsu J.T., Yang S.G., Yu J.H., Huang H.L. Biomechanical Effect of Orthodontic Treatment of Canine Retraction by Using Metallic Orthodontic Mini-Implant (OMI) Covered with Various Angles of Revolving Cap, Appl Bionics Biomech, 12(2021): doi: 10.1155/2021/9952392

Kiangklom K., Thongsri J., Wangman R., Tuntiwong K., Biomechanical Pattern of Canine Distalization in the Miniscrew Position: a Finite Element Analysis, STEMa2022, SSB-OR01

Tuntiwong K., Phasukkit P., Tungjitkusolmun S., Deep Learning-Based Acoustic Emission Scheme for Nondestructive Localization of Cracks in Monolith Zirconia Dental crown

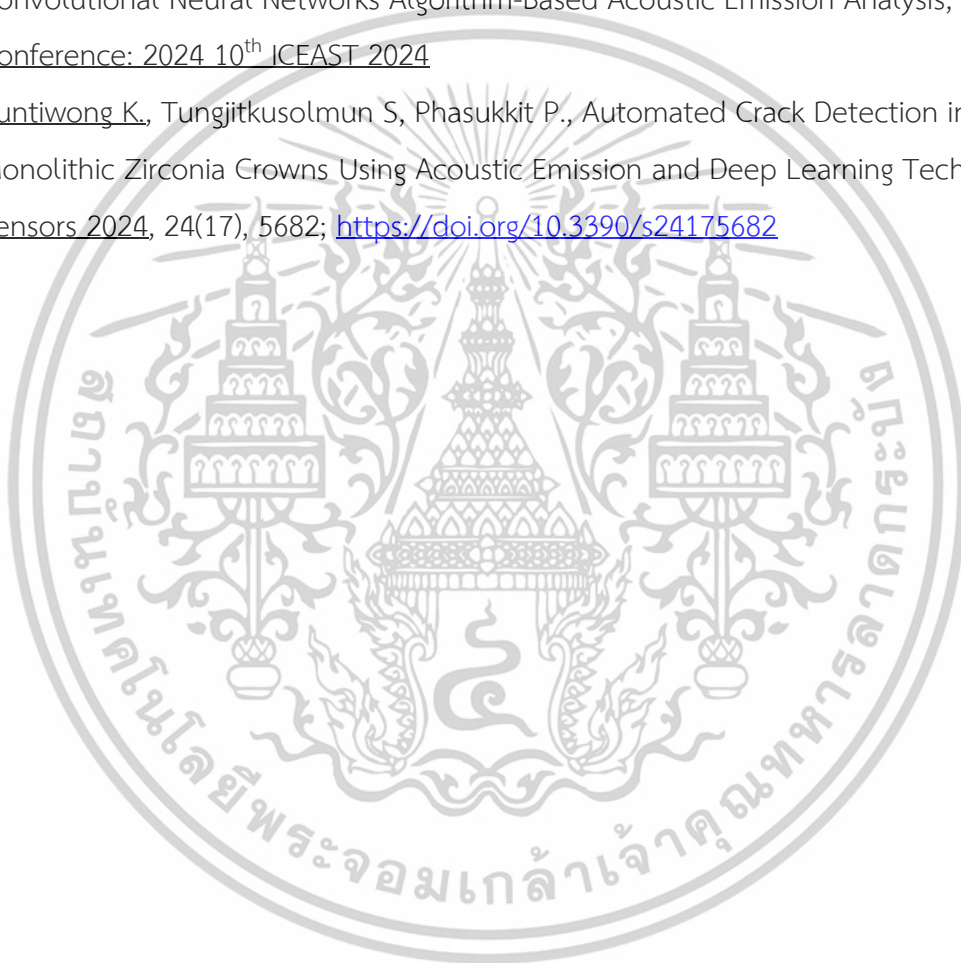
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

under Load, Conference: 2023 8th iSTEM-Ed: doi: [10.1109/iSTEM-Ed59413.2023.10305739](https://doi.org/10.1109/iSTEM-Ed59413.2023.10305739)

Tuntiwong K., Phasukkit P., Tungjitkusolmun S., Continuous Wavelet Transform based SqueezeNet for Damage Classification of Monolith Zirconia Dental Crowns Using Acoustic Emission Analysis, Conference: 2024 10th ICEAST 2024

Tuntiwong K., Wangman R., Sritart H., Kanchanatawewat K., Tungjitkusolmun S., Phasukkit P., Crack Localization Detection in Monolith Zirconia Dental crowns via 1D-Convolutional Neural Networks Algorithm-Based Acoustic Emission Analysis, Conference: 2024 10th ICEAST 2024

Tuntiwong K., Tungjitkusolmun S, Phasukkit P., Automated Crack Detection in Monolithic Zirconia Crowns Using Acoustic Emission and Deep Learning Techniques, Sensors 2024, 24(17), 5682; <https://doi.org/10.3390/s24175682>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้