

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทปรีทัศน์วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต การศึกษาการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ วิถีไฟไนต์อีลิเมนต์ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดในการศึกษาและออกแบบทางด้านวิศวกรรม

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตและการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

Velmurugan et al., 2012 ได้ทำการทดสอบวัสดุคอมโพสิตที่มีวัสดุเมทริกซ์เป็นอีพ็อกซีเรซิน และใช้เส้นใยธรรมชาติจากต้นตาลโตนดเป็นวัสดุเสริมแรง โดยในการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 และใช้การวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์ ANSYS เพื่อเป็นการลดความสิ้นเปลืองของวัสดุและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นทำการเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการใช้คอมพิวเตอร์อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขของการศึกษา

Sanei et al., 2019 ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตประเภทเทอร์โมพลาสติกซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวเลือกวัสดุเมทริกซ์เป็นโอนิกซ์ (Onyx) และมีวัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ซึ่งการทดสอบความแข็งแรงดึงดำเนินไปตามมาตรฐาน ASTM D3039 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของอัตราส่วนของปริมาตรเส้นใย เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าวัสดุคอมโพสิตซึ่งผลิตด้วยวิธีการพิมพ์ยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าข้อมูลการพรีเพรกวัดด้วยอีพ็อกซี เป็นเหตุมาจากปริมาตรของวัสดุเสริมแรงที่ต่างกัน และวัสดุเมทริกซ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุคนละชนิดกับวัสดุพรีเพรกที่กล่าวถึงในงานวิจัย

M. Kazi et. al., 2020 ได้ประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) ในการออกแบบวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตซึ่งมีเมทริกซ์เป็นโพลิพอลิซีน และมีเส้นใยฝ้ายเป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้มีการพัฒนาปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการหาปริมาณการเติมเส้นใยฝ้ายที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมากที่สุด โดยใช้ชุดข้อมูลการเทรนโมเดลในการตั้งข้อมูลขาเข้า (Input) เป็นค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุและค่าพลังงาน

และตั้งขาออก (output) เป็นปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมในวัสดุคอมโพสิต ผลการออกแบบพบว่า ปริมาณการเติมเส้นใยฝ้ายที่เหมาะสมอยู่ที่ 14.38 wt% จึงทำให้ได้ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ต้องการ และงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงข้อได้เปรียบในการใช้ปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาค่าเหมาะสมสุดในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต และยังสามารถนำโมเดลที่ได้จากการเทรนไปใช้ต่อในงานวิจัยต่อยอดในอนาคตได้

Suchat et al., 2020 ได้ทดสอบและปรับปรุงคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ชีวภาพสำหรับวัสดุเชิงวิศวกรรมที่ได้จากยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR50) ซึ่งได้มาจากการดัดแปลงโครงสร้างจากยางธรรมชาติกับอีพ็อกซีเรซิน และนาโนเซลลูโลสซึ่งได้จากต้นยูคาลิปตัส ผลที่ได้คือวัสดุนาโนคอมโพสิตและได้นำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทั้งการทดสอบคุณสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 และการทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric ผลจากการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบทำให้ได้สูตรส่วนผสมที่เหมาะสม และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ชีวภาพสำหรับวัสดุเชิงวิศวกรรมของนาโนคอมโพสิตชนิดใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ที่มีผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่ดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Ramalingam et al., 2021 ได้ทำการทดสอบวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติจากเครื่องพิมพ์ Markforged รุ่น X7 โดยเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ใช้โอบินซ์เป็นเมทริกซ์ และเลือกเส้นใยแก้ว (Fiber glass) เป็นวัสดุเสริมแรง โดยทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับพลังงาน ผ่านการทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact test) ตามมาตรฐาน ASTM และกำหนดตัวแปรต้น 2 ตัวแปร คือรูปแบบการพิมพ์วัสดุแต่ละชั้น (รูปแบบสามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยม) และความหนาแน่นการเติมของวัสดุ (30%, 40% และ 50%) ผลการทดสอบพบว่าการพิมพ์รูปแบบหกเหลี่ยมสามารถดูดซับพลังงานได้ดีที่สุดจากรูปแบบทั้งสามที่ทำการทดสอบ และความหนาแน่นการเติมที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานออกมาดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Li et al., 2022 ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐานทั้งการทดสอบความแข็งแรงดึง การทดสอบแรงกด การทดสอบการดัดโค้ง และการทดสอบการรับแรงกระแทก โดยผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของรูปแบบการพิมพ์และองค์การเรียงตัวของวัสดุเสริมแรงที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และผลวิจัยชี้ให้เห็นว่าการผลิตวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ ไม่เหมาะกับการผลิตชิ้นงานที่มีรอยบากจำนวนมาก

El Essawi et. al., 2024 ได้ทำการทดสอบวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ โดยในขั้นตอนการออกแบบการทดลองได้ใช้วิธี Taguchi ในการออกแบบเนื่องจากจำนวนตัวแปรของการทดสอบมีจำนวนมาก การใช้วิธี Taguchi จึงช่วยลดจำนวนการทดลองที่ไม่จำเป็น จากนั้นได้ทำการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่การตั้งค่าการพิมพ์ต่าง ๆ จากนั้นได้ผลการทดสอบว่าตัวแปรต้นที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางกลมากที่สุด คือ องศาการวางตัวของเส้นใย (เนื่องจากการทดสอบความแข็งแรงดึง) โดยมีส่วน 54.13% และค่าเปอร์เซ็นต์การเติมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลเป็นลำดับถัดมาที่ 16.25% และการเลือกชั้นการพิมพ์ที่มีเส้นใยเสริมแรงมีผลน้อยที่สุด (10.12%)

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Arriaga et al., 2007 ได้ใช้ซอฟต์แวร์แอนซิส (ANSYS) ในการจำลองการทดลองประเภทสภาวะกึ่งคงที่ (quasi-static test) โดยได้เลือกวัสดุพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (PP) และชนิดโพลีคาร์บอเนต/อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (PC-ABS) ในการทดลองจริงของการทดสอบแรงดัดงอแบบสามจุด และการทดสอบเพนเทรชัน โดยเมื่อเทียบผลจากการทดลองจริงและการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์พบว่าข้อมูลผลการทดสอบมีความสัมพันธ์กันทั้งรูปร่างการตอบสนองจากการทดสอบ และค่าของข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการทดสอบ

Shahani et al., 2008 ได้นำเสนอการจำลองกระบวนการรีดร้อนของโลหะอลูมิเนียม AA5083 โดยวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในการรีดร้อน ความเค้น ความเครียดของโลหะที่สภาวะคงที่ (steady state) โดยกำหนดตัวแปรหลักของกระบวนการรีดได้แก่ รูปทรงของการรีด ภาระน้ำหนักและความเร็วในการรีด และเปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลง โดยประเมินการลู่เข้าของคำตอบจากการทดลองและทฤษฎี นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้โมเดลปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายพฤติกรรมของกระบวนการรีดโลหะเพื่อช่วยลดเวลาที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Chang et al., 2009 ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์พลศาสตร์ที่ไม่เป็นเส้นตรงของการทดสอบแรงกระแทกของล้อจากสมาคมวิศวกรยานยนต์นานาชาติ (Society of Automotive Engineers International) โดยใช้ในการทำนายความเสียหายของล้อรถยนต์ โดยได้ผลสรุปของงานวิจัยว่าการระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถใช้ลดต้นทุนจากการทดลอง และมีผลการทำนายที่ใกล้เคียงและมีความน่าเชื่อถือเมื่อเทียบกับการทดสอบจริง เมื่อตั้งค่าขนาดของเมชและระยะขั้นของเวลาที่เหมาะสม โดยสามารถทำนายช่วงวิกฤตของการแตกหักเพื่อทำนายการแตกหักของล้อรถยนต์ในการทดสอบแรงกระแทกได้

2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

Leusink et al., 2015 ได้ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบแม่นยำหลายระดับในการออกแบบใบพัดของเฮลิคอปเตอร์ทั้งในขณะบินแนวดิ่งและขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยในขั้นตอนการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำ (Low fidelity data) ได้ใช้ Helicopter Overall Simulation Tool (HOST code) ประกอบกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) ในการเลือกรูปทรงใบพัดไปใช้ในการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับสูง (High fidelity data) ต่อไป และในขั้นตอนการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับสูงได้ใช้การจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics simulation) และนำข้อมูลไปสร้างสมการจำลองความแม่นยำระดับสูง จากนั้นนำสมการจำลองไปใช้ในเทคนิคการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกครั้งเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูลสมการจำลองในทุกระดับความแม่นยำ

Ariyarat et al., 2015 ได้ทำการออกแบบแพนอากาศ (Airfoil) โดยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ร่วมกับเทคนิคการไขว้เปลี่ยนแบบกระจายหลายส่วน (Multi-Modal Distribution Crossover) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีการไขว้เปลี่ยนแบบกระจายส่วนเดียว (Unimodal Normal Distribution Crossover) ให้มีอัตราการสร้างประชากรที่มากกว่าเมื่อเทียบกับประชากรรุ่นเริ่มต้น โดยที่ผลจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการไขว้เปลี่ยนด้วยวิธีการอื่นอีก 2 วิธี ได้แก่ วิธีการไขว้เปลี่ยนแบบผสมผสาน (Blended Crossover : BLX) และวิธีการไขว้เปลี่ยนแบบกระจายส่วนเดียว ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าได้ความหลากหลายและกระจายตัวของข้อมูลที่ดีกว่า นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการออกแบบแพนอากาศ

Bellary et al., 2016 ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบต่าง ๆ ได้แก่ คริกกิงแบบดั้งเดิม (Ordinary Kriging), แบบ Universal Kriging และแบบ Blind Kriging รวมทั้งเปรียบเทียบร่วมกับฟังก์ชันการประมาณค่าพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Approximation) จากนั้นนำไปใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบลูกผสม (Hybrid Genetic Algorithm) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบใบพัดแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal impeller) ของเครื่องจักรอัดของไหล (Turbomachinery design) โดยใช้ข้อมูลความแม่นยำสูงจะเข้ามาจากผลของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) หลังจากการเปรียบเทียบ พบว่าผลจากการออกแบบด้วยวิธี Blind Kriging สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบได้ดีที่สุด

Ariyarat et al., 2018 ได้ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบความแม่นยำหลายระดับด้วยวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของภาพใหญ่โดยใช้สมการจำลองแบบลูกผสมในการออกแบบใบพัดสำหรับอากาศยานเฮลิคอปเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพใบพัดที่ดีที่สุดในการบินขึ้นและลง โดยในขั้นตอนการคำนวณส่วนเบี่ยงเบนเฉพาะที่ (Local deviation)

ทำนายจากวิธีคริกกิง (Kriging method) ซึ่งใช้ข้อมูลความแม่นยำระดับสูงโดยวิเคราะห์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และสมการจำลองวงกว้าง (Global model) ทำนายจากฟังก์ชันพื้นฐานรัศมี (Radial basis function) ซึ่งใช้ข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีโมเมนต์ขององค์ประกอบใบพัด (Blade Element Momentum Theory : BEMT) โดยผลลัพธ์จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ได้จากวิธีคริกกิงแบบดั้งเดิมและจากวิธีโคคริกกิง (Co-Kriging method) และพบว่าวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของภาพใหญ่โดยใช้สมการจำลองแบบลูกผสมของงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพ สามารถลดจำนวนการทดลองความแม่นยำระดับสูงได้

Zhou et al., 2021 ได้นำเสนอวิธีการการใช้สมการจำลองแบบหลายความแม่นยำเป็นสมการจำลองที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยในขั้นตอนแรกได้สร้างชุดข้อมูลคำตอบพาเรโต (Pareto solutions) จากข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำ ต่อมาได้สร้างสมการจำลองข้อมูลแบบหลายความแม่นยำซึ่งสร้างมาจากข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำและข้อมูลความแม่นยำระดับสูง ซึ่งคัดเลือกมาจากชุดข้อมูลคำตอบพาเรโตจากขั้นตอนแรกซึ่งนำมาคำนวณฟังก์ชันระยะห่างของข้อมูล (Crowding distance) จากนั้นนำค่าความแข็งแรงข้อมูลมาประเมินโดยใช้สมการความแม่นยำหลายระดับ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการสาธิตให้เห็นถึงประสิทธิภาพเทียบได้กับข้อมูลความแม่นยำระดับสูงซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำการทดลองได้อย่างมีนัยสำคัญ

Phiboon et al., 2021 ได้ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบความแม่นยำหลายระดับ หลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective multi fidelity optimization) ในการออกแบบแพนอากาศ (Airfoil) สำหรับใช้ในอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (Fixed-wing UAVs) โดยในขั้นตอนการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธี Panel ผ่านซอฟต์แวร์ (Javafoil) และในขั้นตอนการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับสูงมาจากการทดลองในอุโมงค์ลม ซึ่งแพนอากาศที่ใช้ในการทดลองในอุโมงค์ลมสร้างขึ้นจากการพิมพ์สามมิติ ซึ่งสมการจำลองที่ใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นสมการจำลองข้อมูลแบบลูกผสม ซึ่งข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำถูกนำมาสร้างเป็นสมการจำลองทดแทนจากวิธีคริกกิง และข้อมูลความแม่นยำระดับสูง ถูกนำมาสร้างเป็นสมการจำลองด้วยฟังก์ชันพื้นฐานรัศมี จากนั้นนำสมการจำลองลูกผสมที่ได้ไปเข้าสู่กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับไม่ครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพรูปแบบแพนอากาศที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าไม่มีงานวิจัยใดที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดจากสมการจำลองหรือการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการออกแบบการขึ้นรูปวัสดุด้วยการพิมพ์สามมิติ งานวิจัยนี้จึงได้นำการสร้างสมการจำลองทดแทนด้วยวิธีคริกกิงมาใช้ในการเพิ่มจำนวนข้อมูลของค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ ผสมผสานกับเทคนิคการหา

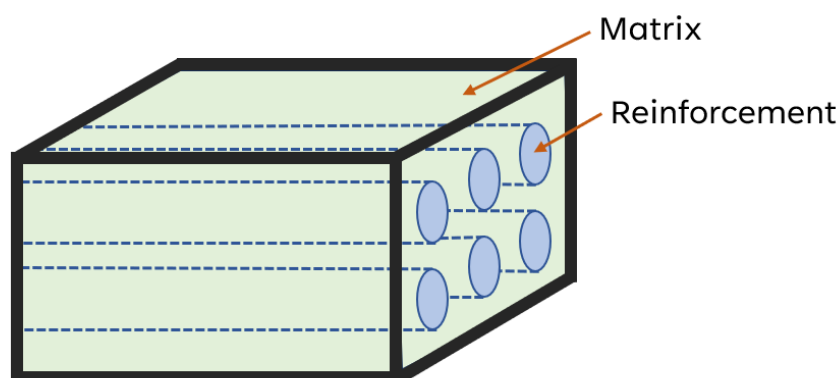
ค่าเหมาะสมสุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม รวมถึงการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของการทดลอง มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการออกแบบการพิมพ์ขึ้นส่วนกล่องต้านแรงบิด สำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยฉบับนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติวัสดุและการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมสุด (Optimization) ในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตสามมิติ และมีการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile test) โดยผลจากการทดสอบจะนำเข้าไปใช้สร้างข้อมูลโดยวิธีคริกกิง (Kriging) และนำผลไปเข้ากระบวนการหาค่าเหมาะสมสุด

2.2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials)

วัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุเชิงซ้อนเป็นวัสดุที่เกิดจากการรวมกันของวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปที่ไม่ละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีประโยชน์และแพร่หลายในวงการวิศวกรรมเนื่องจากมีข้อได้เปรียบทั้งจากคุณสมบัติวัสดุที่นำมารวมกัน และจากวิธีการผลิตวัสดุนั้น ๆ แต่มีข้อเสียคือต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงกว่าวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมแบบดั้งเดิม โดยทั่วไปแล้วการผลิตวัสดุคอมโพสิตประเภทที่ทำจากพอลิเมอร์จะมีหลายประเภท แต่เนื้อวัสดุที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตนั้นจะสามารถแบ่งหลักได้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นวัสดุเมทริกซ์ซึ่งจะช่วยให้วัสดุคอมโพสิตนั้นคงรูปร่างได้ ช่วยยึดวัสดุเสริมแรงไว้ด้วยกัน และส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งช่วยเสริมให้วัสดุมีความแข็งแรงและความแข็งแรง



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการรวมกันของวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต

2.2.1.1 วัสดุเมทริกซ์ (Matrix)

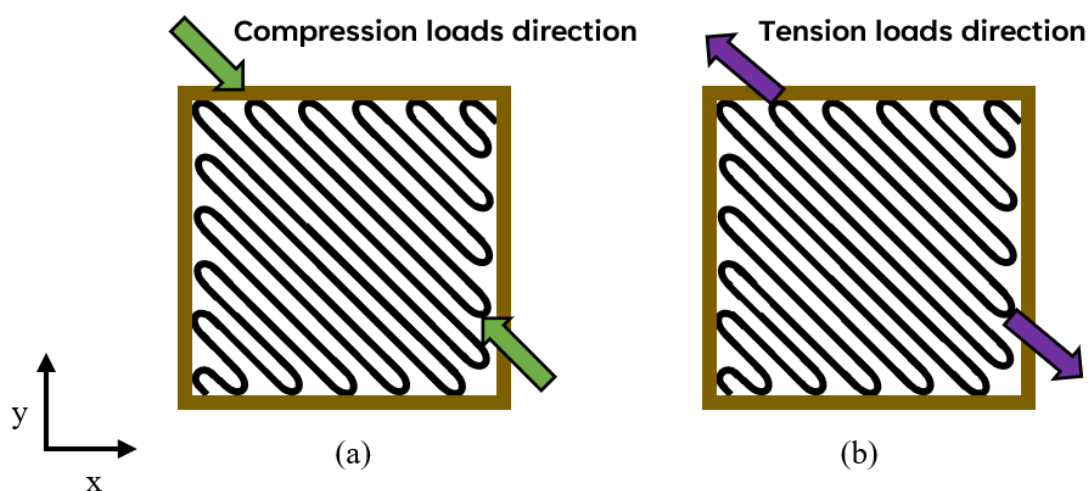
มีบทบาทในการรักษารูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต ทั้งยังช่วยรักษาระยะของวัสดุเสริมแรงภายในชิ้นงาน และยึดเหนี่ยววัสดุเสริมแรงไว้เข้าไว้ภายในวัสดุคอมโพสิต

โดยทั่วไปวัสดุเมทริกซ์ที่ใช้วัสดุคอมโพสิตมักจะเป็นวัสดุจำพวกเทอร์โมเซต (Thermosets) เช่น พลาสติกประเภท PLA (Polylactic Acid) หรือวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เช่น โอนิกซ์ (Onyx) และไนลอน (Nylon) ซึ่งวัสดุส่วนที่เป็นเมทริกซ์จะมีคุณสมบัติด้านความเหนียวและความยืดหยุ่นที่โดดเด่นกว่าวัสดุเสริมแรง จึงช่วยในด้านการคงรูปร่างโดยรวมของชิ้นงาน

2.2.1.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement)

มีหน้าที่ในการเสริมคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตโดยรวม และมีบทบาทหลักในการรับแรงกระทำเมื่อวัสดุคอมโพสิตเกิดความเค้นในการใช้งาน ประเภทของวัสดุเสริมแรงที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีหลายประเภท เช่น ในรูปแบบอนุภาค (Particle) เช่น อนุภาคอลูมินา อนุภาคซิลิกา เป็นต้น หรืออาจเป็นรูปแบบเส้นใย (Fiber) เช่น เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยคาร์บอน ซึ่งวัสดุเสริมแรงมักจะมีคุณสมบัติความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่ง (Stiffness) ที่ดีกว่าเมทริกซ์

วัสดุคอมโพสิตซึ่งเป็นการรวมวัสดุเมทริกซ์ และวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติของวัสดุทั้งสองเข้าด้วยกัน คือมีรูปร่างและความยืดหยุ่นจากวัสดุเมทริกซ์ ในขณะที่มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งจากวัสดุเสริมแรง โดยสามารถปรับแต่งคุณสมบัติได้จากกระบวนการผลิต เช่น การเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุเสริมแรงหรือเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้เหมาะกับการใช้งานได้ หรือการเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุเมทริกซ์จะทำให้มีความยืดหยุ่น มีคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) และความแกร่ง (Toughness) ของวัสดุที่มากกว่า โดยรูปที่ 2.2 แสดงภาพตัวอย่างของวัสดุคอมโพสิตเมื่อถูกแรงกระทำ ซึ่งวัสดุเมทริกซ์จะช่วยคงรูปร่างของวัสดุคอมโพสิตไว้ และเส้นใยของวัสดุเสริมแรงจะช่วยรับแรงที่มากกระทำเมื่อแรงกระทำมีทิศทางที่ตรงกับแนวตามยาวของเส้นใย



รูปที่ 2.2 ภาพตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตเมื่อรับแรง (a) เมื่อรับภาระแรงกด และ (b) เมื่อรับภาระแรงดึง

2.2.2 การพิมพ์วัสดุคอมโพสิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

จากที่กล่าวข้างต้นว่าวัสดุคอมโพสิตจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรง ซึ่งในการผลิตวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิตินั้น ก็เช่นเดียวกัน แต่จะมีความแตกต่างจากวิธีการผลิตแบบอื่น ๆ ตรงที่วัสดุทั้งในส่วนของวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงที่นำมาพิมพ์ จะเริ่มต้นมาจากการเป็นเส้นใยซึ่งนำมาพิมพ์รวมกันทีละชั้นจนขึ้นงานขึ้นรูปสมบูรณ์ โดยข้อได้เปรียบของการพิมพ์ขึ้นงานทีละชั้น ทำให้มีความยืดหยุ่นในการปรับแต่งคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งานได้อย่างอิสระ โดยในเครื่องพิมพ์วัสดุคอมโพสิต 3 มิติ Markforged X7 จะสามารถจำแนกการปรับแต่งการพิมพ์จากวัสดุทั้งสองชนิดที่นำมาใช้ในการผลิตได้ดังนี้

2.2.2.1 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเมทริกซ์

โดยทั่วไป การตั้งค่าการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตสามมิติของเครื่องพิมพ์ Markforged ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเมทริกซ์ จะแบ่งได้เป็น 4 ส่วนสำคัญดังนี้

1) การตั้งค่าความหนาแน่นการเติม (Infill density) ซึ่งการปรับแต่งค่าคุณสมบัติส่วนนี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตทั้งชิ้นงาน หากกำหนดค่าความหนาแน่นการเติมสูงเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นและความแข็งแรง แต่จะใช้เวลาในการพิมพ์นานและสิ้นเปลืองวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ ในทางกลับกัน หากตั้งค่าความหนาแน่นการเติมน้อยจนเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานไม่แข็งแรง หรือน้ำหนักเบาจนเกินไปเนื่องจากมีความว่างเปล่าภายในชิ้นงานมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางประเภท ดังนั้นการตั้งค่าความหนาแน่นการเติมที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ ช่วยให้สามารถใช้วัสดุในการพิมพ์ได้อย่างคุ้มค่าต่อการใช้งาน และประหยัดเวลาที่ใช้ในการพิมพ์

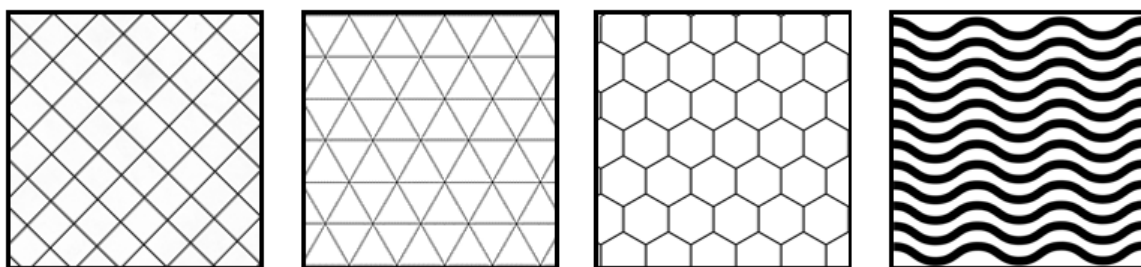
2) การตั้งค่ารูปแบบการพิมพ์ (Fill pattern) โดยซอฟต์แวร์ของ Markforged สามารถตั้งค่าให้เติมการพิมพ์วัสดุตัน (Solid) ได้ แต่การตั้งค่าการเติมให้วัสดุตันสิ้นเปลืองการใช้วัสดุและเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ ดังนั้นการปรับในส่วนนี้จะเกี่ยวกับการพิมพ์โครงสร้างภายในชิ้นงานให้เหมาะสมกับการนำชิ้นงานไปใช้ เนื่องจากการตั้งค่าในส่วนนี้จะส่งผลต่อความอิสระของการตั้งค่าความหนาแน่นการเติม ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสั่งพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ Markforged จะมีรูปแบบการพิมพ์ให้เลือกได้แก่ รูปแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular pattern), รูปแบบสามเหลี่ยม (Triangular pattern) รูปแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal pattern) และรูปแบบไจรอยด์ (Gyroid pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.1) การพิมพ์รูปแบบสี่เหลี่ยม มีช่วงการตั้งค่าความหนาแน่นการเติมของวัสดุคอมโพสิตได้สูงที่สุด สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 92 เปอร์เซนต์

2.2) การพิมพ์รูปแบบสามเหลี่ยม สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 28 ถึง 52 เปอร์เซ็นต์ มีความโดดเด่นเรื่องความสามารถในการรับน้ำหนัก และคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้าง

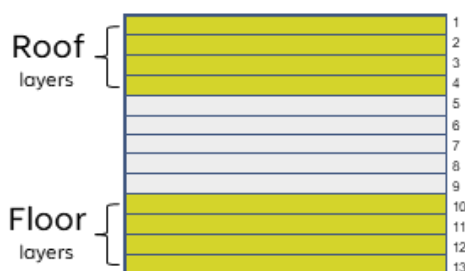
2.3) การพิมพ์รูปแบบหกเหลี่ยม สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 18 ถึง 62 เปอร์เซ็นต์ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องชี้ว่าการตั้งค่ารูปแบบการพิมพ์เป็นหกเหลี่ยมจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกได้ดีที่สุด (Ramalingam et al., 2021)

2.4) การพิมพ์รูปแบบไจรอยด์ สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 28 ถึง 62 เปอร์เซ็นต์ มีความโดดเด่นเรื่องการใช้เปอร์เซ็นต์การเติมที่น้อย แต่ยังให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ดี มีการกระจายน้ำหนักที่ดี และความแข็งแรงเกือบทุกทิศทาง



รูปที่ 2.3 รูปแบบการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ รูปแบบสี่เหลี่ยม รูปแบบสามเหลี่ยม รูปแบบหกเหลี่ยม และรูปแบบไจรอยด์ เรียงจากซ้ายไปทางขวาตามลำดับ

3) การตั้งค่าจำนวนชั้นของรูฟและฟลอร์ (Roof & Floor layers) คือการตั้งค่าจำนวนของชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดที่จะพิมพ์เพียงแค่วัสดุเมทริกซ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยจะไม่มีการพิมพ์วัสดุเสริมแรงลงไปจำนวนชั้นของการตั้งค่าในส่วนนี้ แสดงดังรูปที่ 2.4



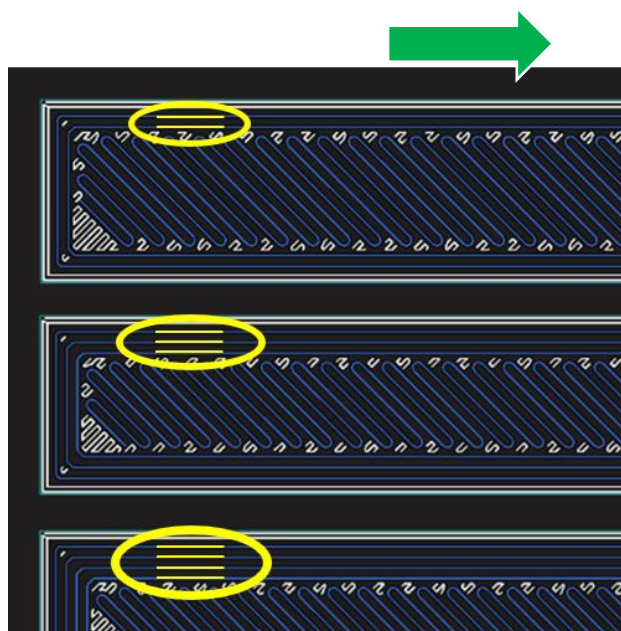
รูปที่ 2.4 ภาพแสดงชั้นของรูฟและฟลอร์ของวัสดุคอมโพสิต

4) การตั้งค่าจำนวนชั้นผนังของวัสดุ (Wall layers) คือ การตั้งค่าจำนวนของชั้นของผนังซึ่งพิมพ์จากวัสดุเมทริกซ์ที่จะปกป้องโดยรอบชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต โดยเป็นชั้นของวัสดุเมทริกซ์ด้านนอกก่อนถึงชั้นของวงแหวนไฟเบอร์ แสดงดังรูปที่ 2.5

2.2.2.2 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเสริมแรง

การตั้งค่าการพิมพ์โดยทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับเมทริกซ์ จะแบ่งได้ดังนี้

1) การตั้งค่าจำนวนของวงแหวนไฟเบอร์ (Concentric fiber ring) คือการตั้งค่าจำนวนวงของเส้นใยที่พิมพ์จากวัสดุเสริมแรง ที่จะถูกกำหนดให้วางปกป้องโดยรอบชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.5



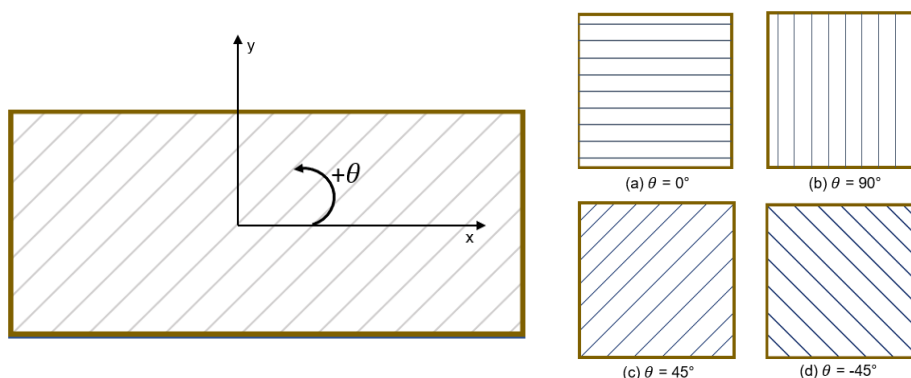
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงจำนวนชั้นของผนังของวัสดุ 2 ชั้น (ลูกศรสีเขียว) และแสดงการนับจำนวนวงแหวนไฟเบอร์จำนวนต่าง ๆ ได้แก่ จำนวน 2 วง (รูปบน) 3 วง (รูปกลาง) และ 4 วง (รูปล่าง)

2) การตั้งค่าประเภทการเติมเส้นใย (Fiber fill type) คือการเลือกรูปแบบวิธีการเติมเส้นใยลงในวัสดุคอมโพสิตในขณะพิมพ์ ซึ่งเครื่องพิมพ์ Markforged X7 สามารถเลือกได้ 2 รูปแบบ คือรูปแบบวงกลมรอบชิ้นงาน (Concentric) และรูปแบบเส้นขนาน (Isotropic)

2.1) การพิมพ์วัสดุเสริมแรงด้วยรูปแบบวงกลมรอบชิ้นงาน (Concentric) จะเป็นการพิมพ์เส้นใยซึ่งช่วยเสริมแรงไปโดยรอบวัสดุ โดยจะช่วยเสริมความแข็งแรงของผนัง และช่วยป้องกันไม่ให้ผนังของชิ้นงานเกิดการเสียรูป

2.2) การพิมพ์วัสดุเสริมแรงด้วยรูปแบบเส้นขนาน (Isotropic) จะทำการพิมพ์แผ่นไฟเบอร์ในทิศทางเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะเดินเส้นใยทั้งหมดให้ขนานกันไปในทิศทางเดียว และเมื่อเดินเส้นใยถึงขอบของชิ้นงาน หัวฉีดจะหันกลับ 180 องศา เพื่อเดินเส้นใยขนานต่อ ซึ่งการพิมพ์เส้นใยในลักษณะนี้จะช่วยเสริมแรงที่มากกระทำด้านข้างของชิ้นงานได้ นอกจากนี้ในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตเป็นรูปแบบเส้นขนาน จะสามารถกำหนดจำนวนของวงแหวนไฟเบอร์รอบชิ้นงานได้ เพื่อช่วยให้พื้นผิวภายนอกชิ้นงานมีความราบเรียบ และเสริมความแข็งแรงของผนังได้

3) การตั้งค่าองศาการวางตัวเส้นใย (Fiber angle) คือการกำหนดองศาที่จะทำการพิมพ์เส้นใยของชิ้นงานคอมโพสิต โดยสามารถเลือกองศาการพิมพ์ในการพิมพ์แต่ละชั้นได้อย่างอิสระ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการตั้งค่าองศาการพิมพ์เส้นใย และตัวอย่างของการเรียงตัวเส้นใยที่องศาต่าง ๆ

4) การตั้งค่าจำนวนชั้นที่จะพิมพ์เส้นใย (Total fiber layer) คือ การกำหนดจำนวนชั้นที่จะใช้ในการพิมพ์เส้นใยคอมโพสิตทั้งหมด โดยในส่วนนี้จะสามารถตั้งค่าอย่างละเอียด เพื่อเลือกได้ว่าจะให้พิมพ์วัสดุเสริมแรงเข้าไปในชั้นใดของการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต

2.2.3 คุณสมบัติความเค้นและความเครียดของวัสดุ (Stress and Strain)

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ คือ ลักษณะทางกายภาพของวัสดุซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมที่วัสดุตอบสนองต่อแรงภายนอกหรือการที่วัสดุนั้นรับน้ำหนัก คุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งาน โดยคุณสมบัติทางกลที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ คุณสมบัติความแข็งแรงดึง ซึ่งพิจารณาได้จากค่าดังต่อไปนี้

1) ความเค้น (Stress) คือผลของแรงกระทำที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยความเค้นเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความแข็งแรงของวัสดุ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

โดย σ คือ ค่าความเค้นของวัสดุ มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

F คือ ค่าของแรงที่กระทำต่อวัสดุ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุที่ถูกแรงกระทำหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

2) ความเครียด (Strain) คือ อัตราส่วนระหว่างระยะยืดของวัสดุที่เปลี่ยนไปเมื่อรับแรงกระทำต่อระยะดั้งเดิมของวัสดุ โดยค่าความเครียดมีความสำคัญในการพิจารณาความแข็งแรง (Stiffness) และความเหนียว (Ductility) ของวัสดุ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.2

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

โดย ε คือ ค่าความเครียดเชิงเส้น

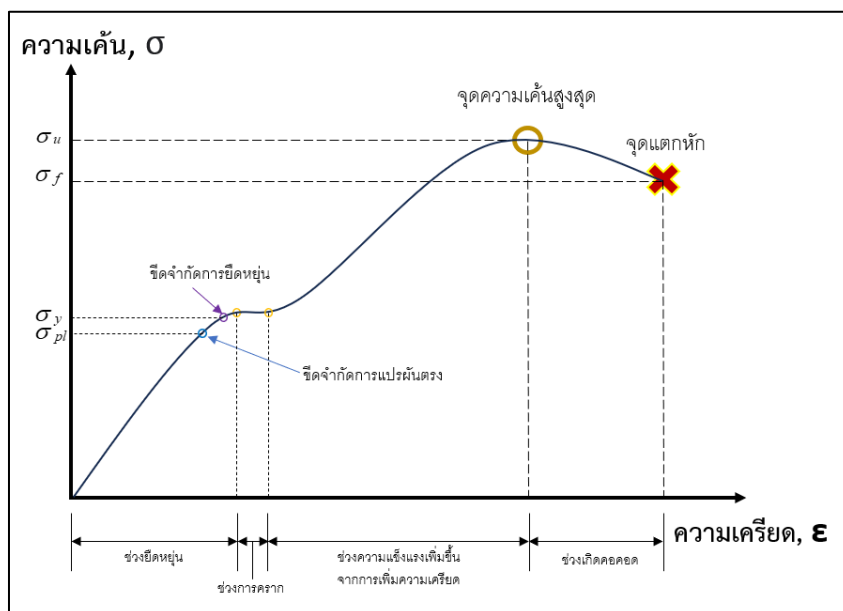
ΔL คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนไปของวัสดุ

L_0 คือ ค่าความยาวดั้งเดิมของวัสดุ

การทดสอบความแข็งแรงดึง คือการทดสอบคุณสมบัติวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในแต่ละช่วงพฤติกรรมของวัสดุ ทำได้โดยการดึงชิ้นงานทดสอบในแนวแกนทำให้เกิดความเค้นตึงฉากและความเครียดตึงฉากในแนวแกน และเมื่อนำค่าทั้งสองมาเขียนเป็นกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว (Ductile material) โดยที่พฤติกรรมในช่วงแรกจะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงที่ค่าความเค้นแปรผันตรงกับความเครียด เรียกว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ซึ่งหากมีการหยุดการให้ภาระหรือหยุดออกแรงดึงต่อชิ้นงาน วัสดุจะสามารถหดกลับสู่สภาพเดิมโดยไม่เสียรูป กล่าวคือเป็นช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ในช่วงนี้มีความเค้นที่แสดงคุณสมบัติทางวัสดุที่สำคัญ 2 จุด คือขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limit, σ_{pl}) คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้โดยที่ความเครียดของวัสดุยังคงแปรผันตรงกับความเค้น และขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic limit, σ_y) คือความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้โดยไม่เกิดความเครียดตกค้าง (Residual strain)

เมื่อวัสดุถูกดึงจนเกิดขีดจำกัดความยืดหยุ่น ในช่วงนี้วัสดุจะเกิดการคราก (Yielding) ในช่วงนี้จะเห็นได้ถึงความชัดเจนในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ ซึ่งจากในรูป 2.7 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเค้นมีค่าคงที่ ความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงการคราก เรียกว่า ความเค้นคราก (Yield stress, σ_y) ในการออกแบบชิ้นส่วนทางกล ความเค้นครากแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ

เมื่อพ้นช่วงการคราก วัสดุจะอยู่ในช่วงที่มีความแข็งแรงเพิ่มจากความเครียด (Strain hardening) ซึ่งวัสดุในช่วงนี้จะสามารถรับความเค้นได้สูงสุดเท่าที่วัสดุชนิดนั้น ๆ จะรับได้ เรียกว่า ความเค้นสูงสุด (Ultimate stress, σ_u) จากนั้นวัสดุจะถูกดึงเกินค่าความเค้นที่รับได้จนเข้าสู่ช่วงคอคอด (Necking) ซึ่งความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ในทางกลับกันความเค้นจะมีค่าลดลง จนวัสดุขาดออกจากกัน วัสดุจึงเข้าสู่จุดความเค้นแตกหัก (Fracture stress, σ_f)



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวเมื่อทำการทดสอบแรงดึง

ค่าความเค้นคราก ความเค้นสูงสุด และความเค้นแตกหัก คือสมบัติเชิงกลในมุมมองของความแข็งแรง (Strength) กล่าวคือ หากพิจารณาเป็นค่าจากผลของการทดสอบจะสามารถนิยามได้ว่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ต้านทานต่อการถูกแรงกระทำดึงให้ยืดออกจากกัน โดยค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) คือค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด

ค่าความเค้นหลัก (Principal Stress) คือ ค่าความเค้นตามแนวแกนเมื่อค่าความเค้นเฉือนมีค่าเป็นศูนย์ ความเค้นหลักจะมีทิศทางตั้งฉากกัน และเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดและต่ำสุดเกิดขึ้น โดยค่าความเค้นหลักมีความสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นหลักสูงสุดและต่ำสุดในการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุเปราะ ค่าความเค้นหลักสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 และภาพประกอบแสดงดังรูปที่ 2.8

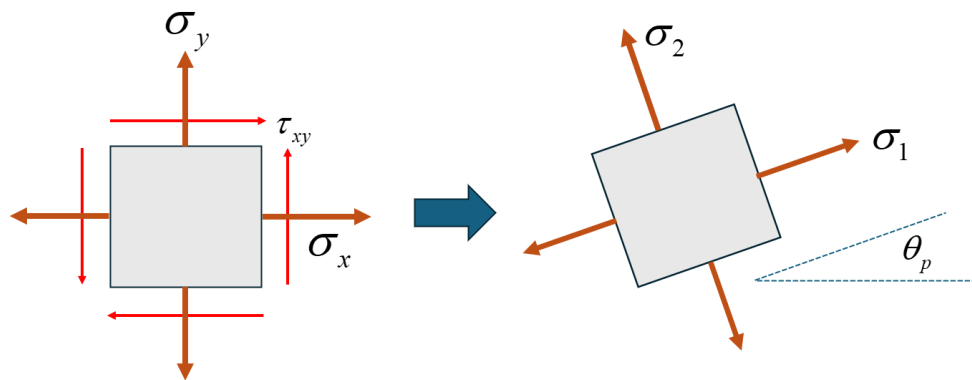
$$\sigma_{1,2} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2} + \tau_{xy}^2} \quad (2.3)$$

โดย $\sigma_{1,2}$ คือ ค่าความเค้นหลัก

σ_x คือ ค่าความเค้นในแนวแกนนอน

σ_y คือ ค่าความเค้นในแนวแกนตั้ง

τ_{xy} คือ ค่าความเค้นเฉือน



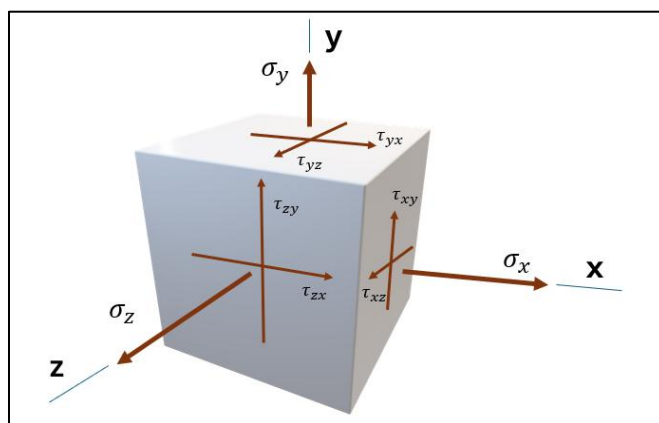
รูปที่ 2.8 อธิบายของค่าความเค้นในทิศทางต่าง ๆ และการเกิดค่าความเค้นหลักในสองมิติ

ค่าความเค้นฟอนมิสเสส (Von mises Stress) คือ ค่าความเค้นแบบสเกลาร์ที่ใช้ในการทำนายว่าวัสดุมีความเสียหายอย่างไร เมื่อได้รับภาระแรงที่ซับซ้อน โดยการลดรูปอย่างง่ายให้เหลือเพียงปริมาณสเกลาร์ ค่าความเค้นฟอนมิสเสสในรูปแบบสามมิติสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 และในรูปแบบองค์ประกอบของความเค้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 และแสดงภาพการกระทำของความเค้นในแนวแกนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.8

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (2.5)$$

โดย σ_v	คือ ค่าความเค้นพอนมิสเสส
σ_x	คือ ค่าความเค้นในแนวแกนอน
σ_y	คือ ค่าความเค้นในแนวแกนตั้ง
$\sigma_{1,2,3}$	คือ ค่าความเค้นหลัก
τ_{xy}	คือ ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน xy
τ_{yz}	คือ ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน yz
τ_{zx}	คือ ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน zx.



รูปที่ 2.9 อธิบายของค่าความเค้นต่าง ๆ ในสามมิติ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในมุมมองของสมบัติด้านความแข็งแรง (Stiffness) พารามิเตอร์ที่สนใจจะได้แก่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Modulus of elasticity) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ หรือค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) คือค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดในช่วงความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยหากวัสดุมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยเมื่อถูกแรงกระทำต่อวัสดุ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสามารถหาค่าได้แสดงดังสมการที่ 2.6

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

โดย E	คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ
σ	คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานรับภาระช่วงยืดหยุ่น
ε	คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานรับภาระช่วงยืดหยุ่น

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) คือ ค่าคุณสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนรูปของวัสดุในทิศทางแนวขวางกับความเค้นในแนวแกน เทียบกับการเปลี่ยนรูปของวัสดุในทิศทางของแนวเดียวกับความเค้นในแนวแกน โดยอัตราส่วนปัวซองสามารถหาค่าได้แสดงดังสมการที่ 2.7

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}} \Bigg|_{\text{apply } \sigma_{axial} \text{ only}} \quad (2.7)$$

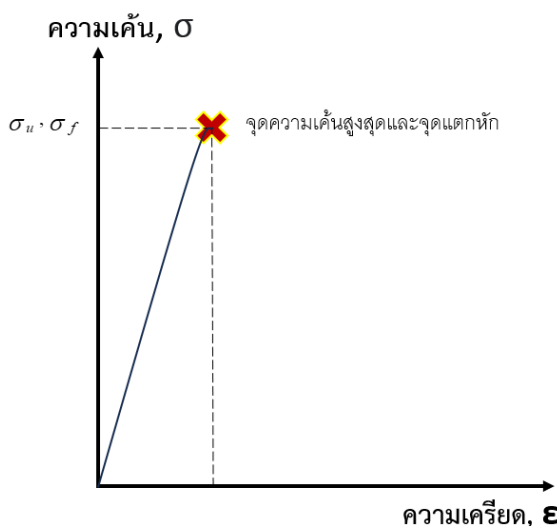
โดย ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

$\varepsilon_{lateral}$ คือ ค่าความเครียดตั้งฉากที่วัดในแนวขวางกับความเค้นในแนวแกน σ_{axial}

ε_{axial} คือ ค่าความเครียดตั้งฉากที่วัดในแนวขวางกับความเค้นในแนวแกน σ_{axial}

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุในรูปที่ 2.7 แสดงถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมเมื่อทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุเหนียว ในทางกลับกันหากทดสอบความแข็งแรงดึงกับวัสดุประเภทแข็งแต่เปราะ (Brittle) จะได้กราฟลักษณะที่แตกต่างออกไป โดยวัสดุประเภทเปราะจะมีการยืดตัวน้อยหรือไม่ยืดตัวเลย เมื่อรับภาระกระทำ หรือเมื่อจะเกิดการแตกหัก ดังนั้นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ และค่าความเค้นแตกหักจึงมีค่าใกล้เคียงกันมาก เพราะเมื่อถึงจุดค่าความเค้นสูงสุดวัสดุจะแตกหักทันที ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อวัสดุเปราะได้รับการแรงดึงในการทดสอบความแข็งแรงดึง แสดงดังรูปที่ 2.10

ในการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต วัสดุเมทริกซ์ที่อยู่ภายนอกมักจะแตกหักก่อน โดยคงเหลือวัสดุเสริมแรงซึ่งเสียรูปอยู่ในชิ้นงาน เมื่อมีการแตกหักเกิดขึ้น เครื่องทดสอบ Universal testing จะหยุดทำงาน ดังนั้นผลลัพธ์จากการทดสอบวัสดุคอมโพสิตจึงมีลักษณะเป็นกราฟของการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุเปราะ



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเปราะเมื่อรับภาระแรงจากการทดสอบแรงดึง

2.2.4 วัสดุไอโซทรอปิกและวัสดุแอนไอโซทรอปิก

2.2.4.1 วัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic material)

คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง อาจหมายถึงในด้านคุณสมบัติทางกลหรือคุณสมบัติทางความร้อนก็ได้ ตัวอย่างวัสดุไอโซทรอปิกโดยทั่วไปในชีวิตประจำวันได้แก่ วัสดุจำพวกแก้ว ยาง และโลหะบางชนิด เช่น อลูมิเนียม เป็นต้น

2.2.4.2 วัสดุแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic material)

คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันไปในแต่ละทิศทางของวัสดุ วัสดุแอนไอโซทรอปิกมีทั้งจากธรรมชาติเช่น ไม้ หรือเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีวัสดุเสริมแรงแบบเส้นใย วัสดุเหล่านี้จะมีพฤติกรรมแบบแอนไอโซทรอปิก เนื่องจากคุณสมบัติในการรับแรงทางกลในชิ้นงานเดียวกันจะแตกต่างกันไปตามทิศทางที่รับแรง นอกจากนี้วัสดุแอนไอโซทรอปิกยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น วัสดุออร์โธทรอปิก (Orthotropic material) วัสดุแอนไอโซทรอปิกตามขวาง (Transversely Isotropic material) และวัสดุแอนไอโซทรอปิกแบบเต็มรูป (Fully Anisotropic material) โดยมีความแตกต่างกันคือ วัสดุออร์โธทรอปิกจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในทั้งสามแนวแกนทิศทางของวัสดุ และวัสดุแอนไอโซทรอปิกตามขวางจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในหนึ่งแนวแกน แต่จะมีคุณสมบัติที่ต่างออกไปในอีกสองทิศทางที่ตั้งฉากกันกับแนวแกนแรก กล่าวคือ มีพฤติกรรมไอโซทรอปิกหนึ่งแนวแกน และพฤติกรรมแบบแอนไอโซทรอปิกในทิศทางตั้งฉากอีกสองแนวแกนที่เหลือ และสุดท้ายคือวัสดุแอนไอโซทรอปิกแบบเต็มรูปซึ่งจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในทุกทิศทางในทุกแนวแกน โดยวัสดุคอมโพสิตที่พิมพ์แบบสามมิติจะมีลักษณะของวัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยที่วางตัวได้อย่างอิสระ ทำให้มีคุณสมบัติเป็น

แอนไอโซทรอปิกได้ทุกแบบขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบการพิมพ์ชิ้นงาน และการวางองค์ประกอบการพิมพ์เส้นใยของวัสดุเสริมแรง

2.2.5 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

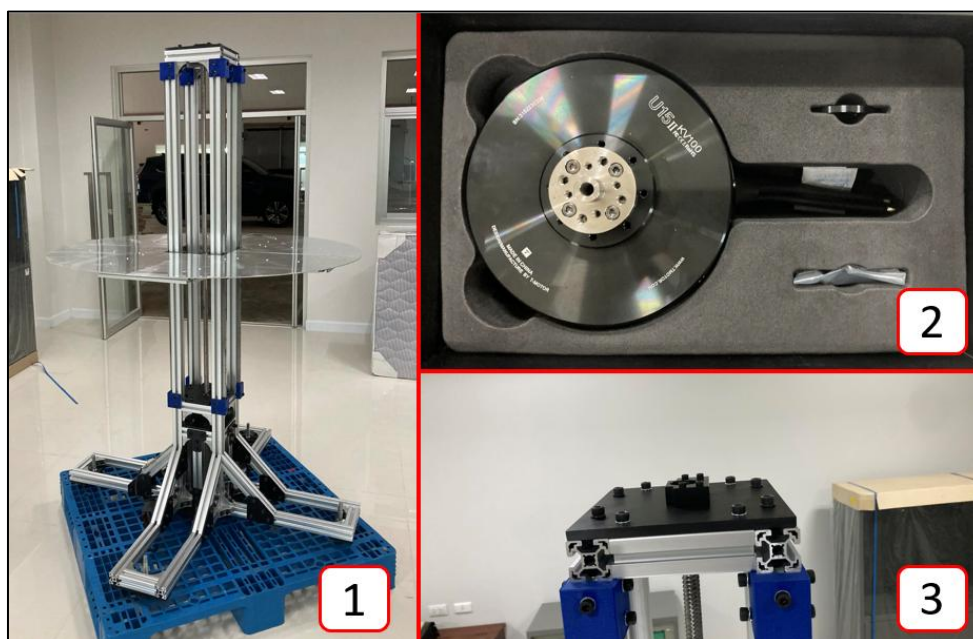
การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial experiment design) คือ เทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัย (Main effect) และผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) ในทุกระดับ (Level of factors) ซึ่งอาจทำให้ใช้เวลาหรือใช้ทรัพยากรในการทดลองมาก แต่การทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้เป็นอย่างดี

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบมีข้อได้เปรียบคือทำให้สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัย และผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยได้ทั้งหมด โดยไม่มีการสุ่มหรือตัดปัจจัยใด ๆ ออกจากการทดลอง ซึ่งในการดำเนินการทดลองแบบนี้จะต้องระบุปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่จะศึกษา และ จากนั้นจึงทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การผสมผสานระดับปัจจัยในทุกความเป็นไปได้ ทำให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

2.2.6 แท่นทดสอบแรงขับ (Thrust stand)

ในอุตสาหกรรมและการศึกษาด้านวิศวกรรมอากาศยาน และการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับ แท่นทดสอบแรงขับ (Thrust stand) เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์และใบพัด โดยแท่นทดสอบแรงขับจะทำงานตามหลักการของกฎข้อที่สามของนิวตัน โดยแรงผลักของใบพัดไปด้านหลังอากาศจะสร้างแรงขับไปข้างหน้าที่เท่ากัน ซึ่งแท่นทดสอบจะทำการวัดแรงขับนี้ แท่นทดสอบใช้เซลล์รับแรง (load cell) ซึ่งแปลงแรงที่กระทำเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อวัดค่าแรงขับที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ควบคู่กับพารามิเตอร์ทางทฤษฎีของใบพัด เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงขับ (thrust coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient) นักวิจัยสามารถประเมินประสิทธิภาพของชุดมอเตอร์-ใบพัด และปรับแต่งคุณลักษณะการบิน เช่น ระยะทางพิสัย และความจุของน้ำหนักรบรรทุก

หน่วยวิจัยจากทางโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ได้พัฒนาแท่นทดสอบแรงขับขนาดใหญ่สำหรับทดสอบใบพัดอากาศยานไร้คนขับ โดยมีลักษณะเป็นแท่นทดสอบขนาดใหญ่ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับอากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ T-Motor รุ่น U15II KV100 ซึ่งให้แรงขับขนาด 36 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยในการใช้งานจะต้องใช้กล่องต้านแรงบิดเพื่อยึดชิ้นส่วนระหว่างตัวมอเตอร์และขาตั้งของแท่นทดสอบเข้าไว้ด้วยกัน โดยที่กล่องต้านแรงบิดนี้จะต้องมีคุณสมบัติทางกลที่เพียงพอในการต้านแรงขับที่เกิดจากใบพัด และแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า จึงเป็นที่มาของการนำวิธีการออกแบบการพิมพ์วัสดุสามมิติของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปใช้งานทางด้านวิศวกรรม



รูปที่ 2.11 ชุดแท่นทดสอบแรงขับซึ่งพัฒนาโดยหน่วยวิจัยจากทางโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งประกอบไปด้วย (1) ขาตั้งแท่นทดสอบ (2) มอเตอร์ไฟฟ้า และ (3) จุดยึดคล้องด้านแรงบิดกับขาตั้งแท่นทดสอบ

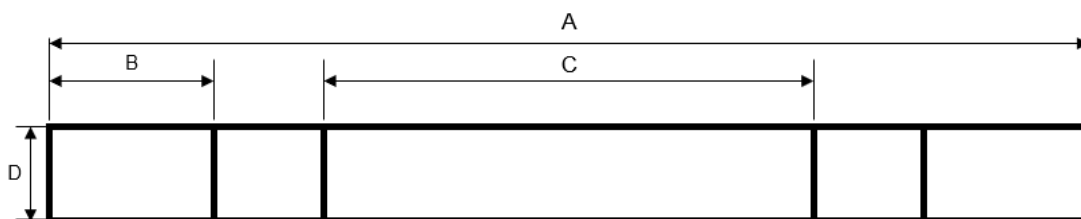
2.2.7 การทดสอบแรงดึงของโพลิเมอร์และคอมโพสิตด้วยมาตรฐาน ASTM D3039

American Society for Testing and Materials (ASTM) คือ สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นผู้กำหนด จัดตั้ง และประกาศมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับรายละเอียดและการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ซึ่งเป็นที่ได้รับการยอมรับจากทั่วโลก

มาตรฐาน ASTM D3039 คือมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบวัสดุคอมโพสิตชนิดพอลิเมอร์โดยเฉพาะ ซึ่งจะมีการออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบ และเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลการทดสอบเป็นค่าเฉพาะของมาตรฐาน ซึ่งจะแตกต่างจากมาตรฐานการทดสอบ ความแข็งแรงดึงของวัสดุประเภทอื่น ๆ โดยมีหลักการที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบดังนี้

2.2.7.1 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039 จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยความยาวของชิ้นงานขั้นต่ำ จะถูกกำหนดจากผลรวมความยาวของบริเวณที่ใช้จับยึดชิ้นงาน บริเวณความยาวเกจ และความกว้างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง เมื่อ A คือระยะความยาวชิ้นต่ำของชิ้นงาน, B คือความยาวของบริเวณที่ใช้จับยึดชิ้นงาน, C คือบริเวณความยาวเกจ และ D คือระยะความกว้างของชิ้นงาน

พิจารณารูปที่ 2.10 ความยาวชิ้นต่ำของชิ้นงานคำนวณได้ดังสมการที่ 2.8

$$A = B + C + 2D \quad (2.8)$$

2.2.7.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง

ในการทดสอบความแข็งแรงดึง จะต้องทำการทดสอบโดยมีเครื่องมือวัดขนาดชิ้นงานก่อนการทดสอบที่ชัดเจนและแม่นยำ และต้องใช้เครื่องทดสอบแรงอนกประสงค์ในการทดสอบ ควบคู่กับขั้นตอนในการทดสอบความแข็งแรงดึงที่มีความน่าเชื่อถือ

2.2.7.3 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดึง

- 1) วัดขนาดของชิ้นงาน โดยทำการบันทึกความกว้างและความหนาของชิ้นงาน
- 2) นำชิ้นงานใส่ในเครื่องทดสอบ โดยต้องจับยึดชิ้นงานกับปากกาจับยึดให้แน่น
- 3) ตรวจสอบว่าชิ้นงานทดสอบถูกจับในทิศทางที่ถูกต้อง
- 4) ทำการกรอกข้อมูลความกว้างและความหนาของชิ้นงานลงในซอฟต์แวร์
- 5) กำหนดขนาดของแรงและความเร็วที่ใช้ในการดึงชิ้นงานทดสอบในซอฟต์แวร์
- 6) กดเซ็กระยะของปากกาจับยึดชิ้นงานให้เป็นศูนย์ และทำการเริ่มดึงชิ้นงาน
- 7) รอจนชิ้นงานถูกดึงจนชิ้นงานทดสอบเกิดจุดแตกหัก ซึ่งเครื่องทดสอบจะหยุดดึงต่อโดยอัตโนมัติ
- 8) ตรวจสอบว่าชิ้นงานทดสอบ เกิดจุดแตกหักในความยาวเกจหรือไม่

9) ทำการบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบและค่าระยะยืดที่เปลี่ยนไปจากซอฟต์แวร์

10) นำชิ้นงานทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ

2.2.8 การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และซอฟต์แวร์แอนซิส

2.2.8.1 การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบของผลลัพธ์โดยประมาณ (Approximate solution) สำหรับการแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ หรือศาสตร์อื่น ๆ ที่ประกอบไปด้วย สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหา โดยวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งโดเมน (Domain) ของปัญหาของเป็นเอลิเมนต์ (element) ย่อย ๆ จากนั้นทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านี้ โดยสมการดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของปัญหา จากนั้นจึงนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์ย่อยเหล่านี้มารวมกันเป็นระบบสมการขนาดใหญ่ แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตกับระบบสมการนี้เพื่อหาคำตอบ(ปราโมทย์ และ เสฏฐวรรธ, 2560)

2.2.8.2 ซอฟต์แวร์แอนซิส และโมดูลแอนซิสเอซีพี (ANSYS and ANSYS ACP)

แอนซิส (ANSYS) เป็นซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งถูกสร้างและพัฒนาโดยจอห์น สแวนสัน (John Swanson) ในปี พ.ศ.2512 โดยแรกเริ่มถูกเขียนขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์งานในโรงงานปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยในปัจจุบันซอฟต์แวร์แอนซิสได้ถูกพัฒนาและเผยแพร่ใช้ในองค์กรต่าง ๆ ทั่วโลก เนื่องจากมีประโยชน์ในการปรับปรุงการออกแบบ ช่วยลดต้นทุนการพัฒนา และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ ซึ่งแอนซิสสามารถใช้เป็นโปรแกรมจำลองการทดลองเพื่อแก้ปัญหาได้หลายหลายรูปแบบ เช่น ปัญหาการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic) และ กลศาสตร์วัสดุ (Mechanical properties) เป็นต้น เนื่องจากมีรูปแบบการใช้งานโปรแกรมที่ใช้งานง่าย เมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์อื่น ๆ ทั้งยังมีศักยภาพในการแก้ปัญหาได้หลากหลายสาขา (ปราโมทย์ และ เสฏฐวรรธ, 2560)

แอนซิสเอซีพี (ANSYS ACP) คือ โมดูลพิเศษภายในซอฟต์แวร์แอนซิส ที่ถูกออกแบบให้มีการใช้งานที่เหมาะสมกับการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตซึ่งประกอบด้วยวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดอยู่ในชิ้นงานเดียว โดยแอนซิสเอซีพีสามารถสร้างโมเดลโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตที่ซับซ้อน กำหนดคุณสมบัติวัสดุ การวางองศาวัสดุเสริมแรง จำลองการตอบสนองต่อเงื่อนไขการรับภาระ วิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุเสริมแรง และวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุเมทริกซ์ โดยแอนซิสเอซีพี จะแบ่งการใช้งานเป็น แอนซิสเอซีพี 프리 (ANSYS ACP Pre) และแอนซิสเอซีพี โพสต์ (ANSYS ACP Post)

แอนซิสเอซีพี พรี (ANSYS ACP Pre)เป็นส่วนหนึ่งของซอฟต์แวร์แอนซิสที่ใช้สำหรับเตรียมและจัดการข้อมูลวัสดุคอมโพสิตก่อนการจำลองและหลังการจำลอง โดยจะมีเครื่องมือและฟังก์ชันที่ช่วยในการสร้างโมเดล โครงสร้าง และคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ส่วนแอนซิสเอซีพี โพสต์ (ANSYS ACP Post) ใช้สำหรับการวิเคราะห์และการนำเสนอข้อมูลคำตอบหลังการจำลองโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต โดยจะมีเครื่องมือและฟังก์ชันที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกราฟิก พล็อตผลคำตอบ และการสร้างรายงานข้อมูลผลคำตอบ ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตจากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์แอนซิส

2.2.9 การสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบ (Objective function)

สมการจำลองทดแทน (Surrogate model) ถูกสร้างเพื่อใช้ในกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อประมาณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective functions) และข้อจำกัด (Constraints) เนื่องจากการทดลองจริงเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าเหล่านี้ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่สูง

ในกระบวนการสร้างสมการจำลองทดแทน มีทางเลือกในการใช้ฟังก์ชันประมาณค่าที่หลากหลาย เช่น ฟังก์ชันรัศมีพื้นฐาน (Radial basis function) ฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial) เป็นต้น แต่ในการสร้างสมการจำลองทดแทนสำหรับฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ การสร้างสมการจำลองด้วยวิธีคริกกิ้งได้รับความนิยมและใช้งานได้จริง เนื่องจากสามารถประมาณค่าได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการคำนวณ และเพิ่มประสิทธิภาพในการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้อย่างดี

2.2.9.1 การสร้างแบบจำลองทดแทนด้วยวิธีคริกกิ้ง (Kriging surrogate model)

วิธีคริกกิ้งแบบดั้งเดิม (Ordinary Kriging) จะสามารถทำนายฟังก์ชันคำตอบได้ ดังสมการที่ 2.9

$$y(x) = \mu(x) + \varepsilon(x) \quad (2.9)$$

โดย $y(x)$ คือ ฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า (Unknown function)

$\mu(x)$ คือ สมการแบบวงกว้าง (Global model)

$\varepsilon(x)$ คือ สมการแบบวงแคบ (Local model)

การใช้ฟังก์ชันสุ่มแบบเกาส์เซียน (Gaussian random function) จุดตัวอย่าง x สามารถแก้ไขได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง $Z(x_i)$ และ $Z(x_j)$ เกี่ยวข้องกับระยะห่างระหว่างจุดที่สอดคล้องกันสองจุดของ x_i และ x_j ซึ่งฟังก์ชันระยะห่างระหว่างจุดต่าง ๆ แสดงดังสมการที่ 2.10

$$d(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^m \theta^k |x_i^k - x_j^k|^2 \quad (2.10)$$

โดย $d(x_i, x_j)$ คือ ฟังก์ชันระยะทางระหว่าง x_i และ x_j

θ^k มีค่าในช่วง $(0 \leq \theta^k \leq \infty)$ และ k^{th} คือ มิติของความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ตัวแปร โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างจุด x_i กับจุด x_j แสดงดังสมการที่ 2.11

$$\text{Corr}[Z(x_i), Z(x_j)] = \exp[-d(x_i, x_j)] \quad (2.11)$$

และการทำนายค่าโดยวิธีคริกก็จะได้ดังสมการที่ 2.12

$$y(x) = \mu(x) + r^T R^{-1} (F - \mu) \quad (2.12)$$

เมื่อ $Z(x_i)$ คือ ค่าเบี่ยงเบนเฉพาะที่ของสมการวงกว้าง, $F = [f(x_1), f(x_2), f(x_3), \dots, f(x_n)]^T$ คือ ค่าของฟังก์ชันการประเมินค่าโดยที่ $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ และ เมื่อ n คือ จำนวนตัวอย่างการออกแบบของข้อมูลความแม่นยำระดับสูง R คือ มิติเมทริกซ์ $n \times n$ โดยมีพิกัด (i, j) สัมพันธ์กับฟังก์ชัน $\text{Corr}[Z(x_i), Z(x_j)]$ และ r คือ เวกเตอร์โดยที่มีมิติความสัมพันธ์ i^{th} ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.13

$$r_i(x) = \text{Corr}[Z(x), Z(x^i)] \quad (2.13)$$

ในสมการจำลองคริกก็ดั้งเดิม $\mu(x)$ จะถือว่ามีความคงที่ และค่าประมาณสำหรับ $\mu(x)$ จะแทนค่าด้วยตัวแปร μ ซึ่งจะได้จากสมการที่ 2.14

$$\mu = [\mu(x), \mu(x), \mu(x), \dots, \mu(x)] \quad (2.14)$$

ซึ่งถูกกำหนดดังสมการที่ 2.15

$$\mu(x) = \frac{I^T R^{-1} F}{I^T R^{-1} I} \quad (2.15)$$

ค่าพารามิเตอร์ θ ในสมการคริกก็จะสามารถถูกกำหนดได้โดยใช้การประมาณความน่าจะเป็นขั้นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation) ดังสมการที่ 2.16

$$\text{Ln}(\mu, \sigma^2, \theta) = -\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln(|R|) \quad (2.16)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวจะสามารถหาคำตอบได้ โดยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) โดยจากค่า θ จะสามารถคำนวณหาค่าความแปรปรวน σ^2 ได้จากสมการที่ 2.17

$$\sigma^2 = \frac{(F - \mu)^T R^{-1} (F - \mu)}{n} \quad (2.17)$$

โดยที่ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (mean squared error) $s^2(x)$ ณ จุด x ของฟังก์ชัน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.18

$$s^2(x) = \sigma \left[1 - r^T R^{-1} r + \frac{(1 - r^T R^{-1} r)^2}{1^T R^{-1} 1} \right] \quad (2.18)$$

โดยที่ 1 หมายถึงเวกเตอร์หน่วย n มิติ

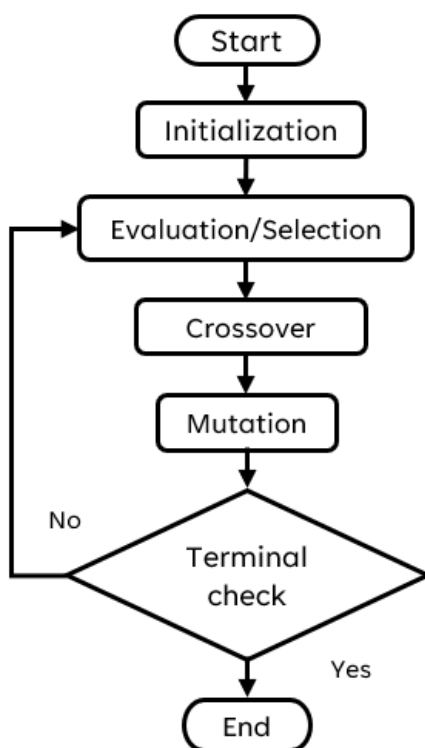
2.2.10 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)

2.2.10.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic algorithm)

การครอบงำของคำตอบ (Domination) หมายถึง การที่คำตอบในรุ่นนั้นไม่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใดที่ดีกว่าคำตอบอื่นในรุ่นเดียวกัน และคำตอบดังกล่าวจะต้องมีอย่างน้อยหนึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าคำตอบอื่น ๆ ดังนั้น การจัดลำดับไม่ครอบงำ จึงหมายถึงการจัดลำดับคำตอบ โดยพิจารณาให้คำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นในชุดคำตอบ ซึ่งบ่งบอกว่าคำตอบนั้นคือคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) คือขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่ใช้ในการจัดการข้อมูล โดยนำทฤษฎีวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตมาใช้ในการคัดเลือกข้อมูลในแต่ละชุด โดยข้อมูลชุดแรกจะเรียกว่า Parent และข้อมูลชุดถัดไปจะถูกเรียกว่า Offspring โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้นำลักษณะการคัดเลือก (Selection) การไขว้เปลี่ยน (Crossover) และการกลายพันธุ์

(Mutation) มาใช้ในการเลือกและสร้างข้อมูลชุด Offspring โดยการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงดังรูปที่ 2.13

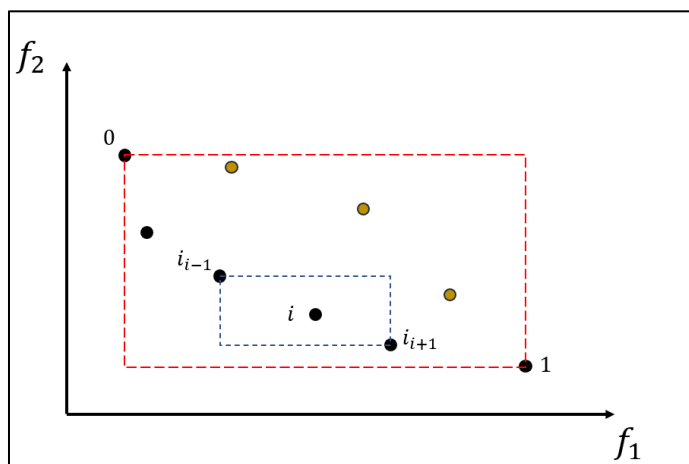


รูปที่ 2.13 การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

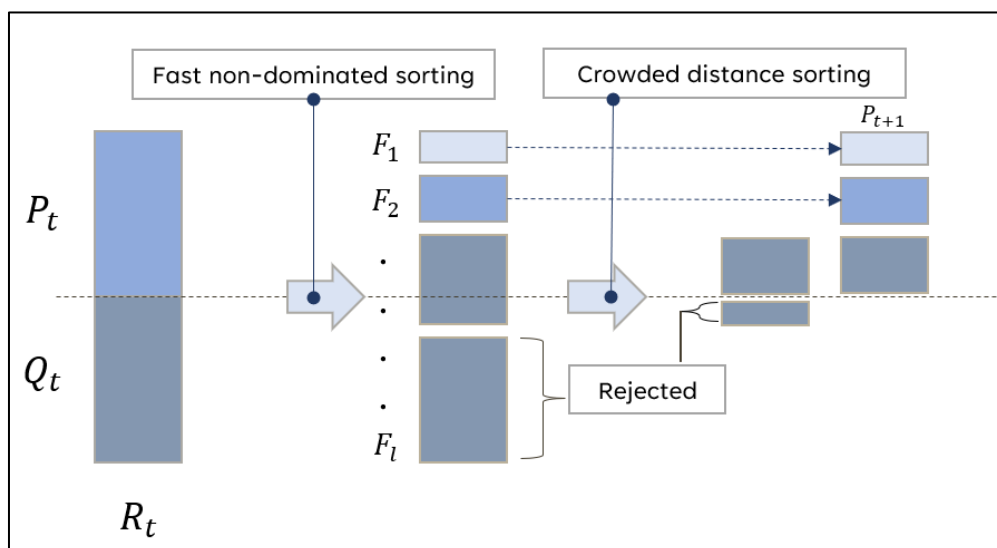
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2 คือ ขั้นตอนวิธีที่มีความสามารถในการจัดลำดับและคัดเลือกข้อมูลเพื่อหาค่าชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ โดยขั้นตอนการประเมิน/การคัดเลือก การไขว้เปลี่ยน และการสุ่มแบบจำลองการกลายพันธุ์ จะประยุกต์ใช้มาจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ กระบวนการจัดลำดับข้อมูลจึงได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการจัดลำดับไม่ถูกครอบงำอย่างรวดเร็ว (Fast-nondominated sorting algorithm) ในการจัดลำดับชุดคำตอบ

ในการจัดลำดับไม่ครอบงำ อาจมีคำตอบที่มีความไม่ถูกครอบงำอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะคัดเลือกระยะห่างต่อไป และเพื่อให้กลุ่มข้อมูลมีการกระจายตัวจึงได้มีการใช้ขั้นตอนวิธีการจัดลำดับจากระยะห่างจากการจัดกลุ่มของข้อมูล (Crowded distance sorting) เพื่อคัดเลือกและจัดลำดับข้อมูล โดยการหาระยะห่างจากกลุ่มคำตอบอื่น แสดงดังรูปที่ 2.14 และการ

ทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2 โดยรวมทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 การคำนวณระยะห่างจากกลุ่มคำตอบอื่น



รูปที่ 2.15 การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2