

การพัฒนาเตียงป้องกันแผลกดทับด้วยกลไกการสลับจุดรับน้ำหนักและ
ระบบระบายความร้อนใต้เตียงที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี
Development of an Anti-Bedsores Bed with Alternating Pressure
Points and a Sub-Bed PID-Controlled Cooling System

กิตติศักดิ์ คงสีไพร, มณฑล ฟักแอม, เกียรติชัย บรรลุลผลสกุล*

Kittisak Khongseeprai, Monthol Fak-am, Kiatchai Banlupholsakul

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก ประเทศไทย

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok, Thailand

* Corresponding author E-mail: kiatchai@psru.ac.th

Received 20 April 2026; Revised 18 September 2026; Accepted 24 September 2026

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ : แผลกดทับเป็นแผลที่เกิดจากการตายของเซลล์ผิวหนังและเนื้อเยื่อใต้ผิวหนัง อันเนื่องมาจากส่วนของร่างกายถูกกดทับ ส่งผลให้การไหลเวียนของเลือดไปเลี้ยงเนื้อเยื่อบริเวณนั้นลดลง ทำให้เนื้อเยื่อได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ประกอบกับความเปื่อยขึ้นจากการถูกกดทับเป็นเวลานานทำให้ผิวหนังเปื่อย เกิดแผลกดทับได้ง่าย หากอาการแผลกดทับรุนแรงจนถึงระยะที่มีเชื้อแบคทีเรียเข้ามาในแผลจนก่อให้เกิดการติดเชื้อจะทำให้ยากต่อการรักษาและเสี่ยงต่อการเสียชีวิตจากการติดเชื้อในกระแสเลือด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเตียงป้องกันแผลกดทับ รวมถึงประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเตียงดังกล่าว

วิธีดำเนินการวิจัย : งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองระยะ ระยะแรกเป็นการออกแบบเตียงป้องกันแผลกดทับตามหลักการสลับจุดรับน้ำหนักเพื่อกระจายแรงกดทับ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดแผลกดทับ ระยะที่สองเน้นไปที่การทดสอบประสิทธิภาพการประเมินผล ประกอบด้วย การทดสอบการรับน้ำหนัก โดยวางวัตถุทดสอบไว้บนพื้นเตียง (Mattress Base) และเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 50 kg จนถึง 150 kg โดยควบคุมน้ำหนักแต่ละระดับไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อการไถ่ตัวของพื้นเตียง นอกจากนี้ ยังได้ทดสอบระบบระบายความร้อนใต้เตียงภายใต้อุณหภูมิห้องจำลองที่ 33 °C เพื่อระบุพารามิเตอร์ (K_p , K_i และ K_d) ที่เหมาะสมต่อการตอบสนองอุณหภูมิที่รวดเร็วของชุดระบบระบายความร้อนต่อค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ 28 °C ท้ายที่สุดมีการประเมินความความรู้สึกของผู้ใช้งาน โดยให้อาสาสมัครสุขภาพดีจำนวน 40 คน จำแนกตามเพศและดัชนีมวลกาย (BMI) นอนบนเตียงป้องกันแผลกดทับเป็นเวลา 30 นาทีขณะเตียงทำงาน เก็บข้อมูลผ่านการสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้างครอบคลุมประเด็นเกี่ยวกับการรับรู้ถึงการเคลื่อนไหวสลับตำแหน่งของเตียง แรงสั่นสะเทือนขณะทำงาน ความไม่สบายตัว และความรู้สึกร้อนบริเวณจุดสัมผัสระหว่างผิวหนังกับที่นอน

ผลการวิจัย : เติ่งป้องกันแผลกดทับแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เติ่งชั้นนอก ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ประกอบด้วยเสาะและคานสำหรับประกอบโครงสร้างภายใน และใช้ลิมิตสวิตซ์ในการควบคุมจังหวะการเคลื่อนที่ ส่วนที่สองคือเติ่งชั้นในที่เป็นส่วนเคลื่อนที่ โดยมีพื้นเติ่ง 2 ชุด วางเรียงสลับกันและเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวตั้งแบบวนลูปลับกัน เพื่อกระจายน้ำหนักตัวของผู้ป่วยตามช่วงเวลาที่กำหนด ส่วนสุดท้ายคือ ชุดระบายความร้อนที่ติดตั้งอยู่ใต้เติ่ง ใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (Proportional, Integral, and Derivative: PID) เพื่อปรับความเร็วรอบพัดลมให้ผู้ป่วยรู้สึกสบายที่สุดและช่วยลดเหงื่อ จากการทดสอบประสิทธิภาพพบว่า พื้นเติ่งมีการโก่งตัวอยู่ที่ 0.236 mm ภายใต้น้ำหนักทดสอบสูงสุด 150 kg ในขณะที่ระบบระบายความร้อนที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อตั้งค่าพารามิเตอร์ (K_p , K_i และ K_d) เป็น 90, 15 และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้ค่าความชันของการตอบสนองอยู่ที่ $-0.101\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ และมีความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิเป้าหมาย $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ ผลการประเมินความพึงพอใจจากอาสาสมัคร พบว่า ความรู้สึกทางกายหรือความไม่สบายขณะนอนบนพื้นเติ่งที่ขยับสลับไปมานั้นอยู่ในระดับต่ำ

สรุป : เติ่งป้องกันแผลกดทับประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ โครงเติ่งด้านนอกแบบคงที่ โครงเติ่งด้านในแบบเคลื่อนที่ได้ และชุดระบายความร้อน ทำงานด้วยการสลับจุดกดทับระหว่างพื้นเติ่งสองชุดที่เคลื่อนที่ขึ้นลงสลับกัน เติ่งสามารถรองรับน้ำหนักสูงสุดถึง 150 kg และสามารถลดอุณหภูมิอากาศใต้เติ่งได้อย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งรักษาอุณหภูมิให้คงที่โดยไม่มีการแกว่งตัวอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดสอบกับอาสาสมัครพบว่า ผู้ใช้ทั้งเพศชายและเพศหญิงมีการรับรู้ถึงการทำงานของกลไกเติ่งในระดับต่ำที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม กลุ่มผู้ที่มีดัชนีมวลกาย (BMI) สูงกว่า 30 ระบุว่ารู้สึกถึงความร้อนและความไม่สบายตัวในระดับที่สูงกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากลักษณะทางสรีรวิทยาที่มีแนวโน้มในการสะสมความร้อนในร่างกายสูงกว่าปกติ

การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ : ได้ต้นแบบเติ่งป้องกันแผลกดทับที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์กับผู้ป่วยติดเตียงเพื่อช่วยลดปัญหาแผลกดทับที่เกิดขึ้นได้

คำสำคัญ : แผลกดทับ, เติ่งป้องกันแผลกดทับ, สลับจุดรับน้ำหนัก, การควบคุมด้วยพีไอดี

Abstract

Background and Objectives: Bedsores are injuries caused by the death of skin cells and underlying tissues due to prolonged pressure on specific parts of the body, which reduces blood circulation to those areas and results in insufficient oxygen supply to the tissues. Additionally, moisture combined with long-term pressure can cause skin maceration, making it more susceptible to developing bedsores. If the condition becomes severe and bacteria enter the wound, causing an infection, it becomes difficult to treat and poses a risk of death from septicemia. Therefore, the present research aimed to design and develop an anti-bedsores bed, as well as to evaluate its efficiency.

Methodology: This research was divided into two phases. The first involved designing an Anti-Bedsore Bed based on the principle of alternating weight-bearing points to distribute pressure, which is the primary cause of bedsores, while the second phase focused on performance testing. The evaluation included a load-bearing test where test objects were placed on the mattress base with weight increments of 50 kg up to 150 kg, maintaining each load for 8 hours to study the deflection of the mattress base. Additionally, an under-bed cooling system was tested at a simulated ambient temperature of 33 °C to identify the optimal parameters (K_p , K_i and K_d) for achieving a rapid temperature response toward a target temperature of 28 °C. Finally, user perception was assessed by having 40 healthy volunteers, categorized by gender and BMI, lying on the Anti-Bedsore Bed for 30 minutes during the operation; data were collected through structured interviews covering their awareness of the bed's alternating movement, vibrations during operation, physical discomfort, and heat sensation at the skin-mattress contact area.

Main Results: The Anti-Bedsore Bed is divided into three primary sections, namely, a stationary outer frame composing of pillars and beams that support the inner structure and utilize limit switches to regulate movement of the inner bed; a mobile inner bed featuring two sets of interleaved mattress bases that move vertically in alternating loops to distribute the patient's body weight at set intervals; a cooling unit installed beneath the bed that employs a PID (closed-loop) controller system to adjust fan speed for optimal patient comfort and sweat reduction. Performance testing demonstrated that the mattress base maintained a deflection of 0.236 mm under a maximum load test of 150 kg, while the PID-controlled cooling system achieved its best performance with parameters (K_p , K_i and K_d) set to 90, 15, and 0.1, respectively, resulting in a response slope of -0.101 °C/s and a steady-state error of only 0.25 °C. Furthermore, subjective evaluations from healthy volunteers indicate that the physical sensation or discomfort experienced while lying on the shifting mattress bases remained at a low level.

Conclusions: The Anti-Bedsore Bed is composed of three primary elements, i.e., a fixed outer frame, a movable inner frame, and a specialized cooling system, all of which function by alternating pressure points through two sets of mattress bases that interchangeably shift upward and downward. This equipment can support a maximum load of 150 kg and is engineered to rapidly lower and stabilize the ambient air temperature beneath the bed without significant fluctuations. Clinical trials involving volunteers indicate that while both male and female users perceived the mechanical movements at a similarly low level, individuals with Body

Mass Index (BMI) over 30 reported more extensive heat and discomfort compared to other groups, a result attributed to their physiological tendency to accumulate more body heat.

Practical Application: An Anti-Bedsores Bed prototype has been developed to benefit bedridden patients by effectively reducing the occurrence of bedsores.

Keywords: Bedsores, Anti-Bedsores Bed, Alternating Pressure Points, PID Control

Introduction

แผลกดทับเป็นภาวะแทรกซ้อนที่พบได้ในผู้ป่วยที่ไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้ เป็นแผลที่เกิดจากการตายของเซลล์ผิวหนังและเนื้อเยื่อใต้ผิวหนัง เนื่องจากส่วนของร่างกายถูกกดทับหรือเสียดสีไปบนวัตถุ เช่น เตียงนอน เก้าอี้ เป็นต้น ซึ่งแรงกดนี้จะส่งผลให้การไหลเวียนของเลือดที่นำไปเลี้ยงเนื้อเยื่อในบริเวณนั้นลดลง ทำให้เนื้อเยื่อได้รับออกซิเจนและสารอาหารไม่เพียงพอ และถ้าหากผู้ป่วยมีอาการเกิดแผลกดทับถึงขั้นรุนแรงจนถึงในระบะที่มีเชื้อแบคทีเรียเข้ามาในแผลจนก่อให้เกิดการติดเชื้อ จะทำให้กระบวนการรักษามีความซับซ้อนและเพิ่มอัตราการเสียชีวิตจากการติดเชื้อในกระแสเลือดได้ [1-2] โดยบุคคลที่มีความเสี่ยงสูงที่อาจก่อให้เกิดแผลกดทับ คือ ผู้ที่มีการเจ็บป่วยรุนแรง หรือผู้ที่มีข้อจำกัดในการเคลื่อนไหว ทั้งนี้ จากสถิติการสำรวจแผลกดทับของโรงพยาบาลรามาริบัติ [3] เมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565 พบว่า ผู้ป่วยทั้งหมดที่นอนในโรงพยาบาลที่มีแผลกดทับ นับรวมทั้งคนที่เป็แผลมาจากบ้าน ผู้ป่วยจากโรงพยาบาลอื่นก่อนย้ายมา และผู้ป่วยที่มาเกิดแผลเพิ่มในโรงพยาบาลอยู่ที่ 11.08 ต่อ 1,000 วันนอน โดยผู้ป่วยที่ตอนรับเข้ามารักษายังไม่มีแผลกดทับ แต่มาเกิดแผลกดทับขึ้นใหม่ระหว่างนอนพักรักษาตัวอยู่ในโรงพยาบาลรามาริบัติอยู่ที่ 5.57 ต่อ 1,000 วันนอน อันเป็นสถิติที่ค่อนข้างสูง สำหรับเกณฑ์มาตรฐานการดูแลทางพยาบาลของโรงพยาบาลระดับตติยภูมิขั้นสูง ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการขาดแคลนบุคลากรในโรงพยาบาล ทำให้ไม่สามารถดูแลได้ทั่วถึง นอกจากนี้ จากผลสำรวจในปี พ.ศ. 2567 ของ DoH Dashboard กรมอนามัย [4] พบว่า จำนวนผู้สูงอายุและผู้ที่มีภาวะพึ่งพิงที่ได้รับการดูแลตาม Care Plan มีจำนวน 454,355 คน ถึงแม้ว่าผู้สูงอายุและผู้ที่มีภาวะพึ่งพิงไม่ใช่ทุกคนที่จะต้องเป็นผู้ป่วยแผลกดทับเสมอไป แต่กลุ่มนี้ถือเป็นกลุ่มเสี่ยงสูงมากเนื่องจากข้อจำกัดด้านการเคลื่อนไหว การรับรู้สึก ภาวะทุพโภชนาการ รวมถึงการขาดผู้ดูแลอย่างใกล้ชิด

แนวทางการป้องกันแผลกดทับคือการลดแรงกดทับและการเสียดสีด้วยการพลิกตะแคงตัวผู้ป่วยอย่างน้อยทุก 2 ชั่วโมง โดยจัดท่านอนตะแคงให้สะโพกเอียงท่ามุม 30 องศาเพื่อไม่ให้เกิดแรงกดโดยตรงบริเวณปุ่มกระดูก และใช้หมอนสอดคั่นระหว่างหัวเข่าและตาตุ่มทั้งสองข้าง ร่วมกับการดูแลรักษาความสะอาดผิวหนัง ซับให้แห้ง ทาโลชั่นหรือวาสลีนเพื่อบำรุงและป้องกันการระคายเคืองจากความเปียกชื้นตลอดจนส่งเสริมโภชนาการให้ได้รับสารอาหารที่จำเป็นอย่างโปรตีน วิตามินซี วิตามินเอ และสังกะสีควบคู่กับการกระตุ้นการไหลเวียนโลหิต และการให้ความรู้แก่ผู้ป่วยและผู้ดูแลอย่างสม่ำเสมอ [5]

จากแนวทางการป้องกันแผลกดทับ จะเห็นได้ว่าหัวใจสำคัญคือ การลดแรงกดทับและแรงเสียดสี รวมถึงการควบคุมความชื้นบนผิวหนัง โดยเฉพาะบริเวณกระเบนเหน็บและก้นกบ ซึ่งเป็นจุดที่พบแผลกดทับได้บ่อยที่สุดถึงร้อยละ 53 [6]

โดยในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีส่งผลให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ ที่ช่วยป้องกันแผลกดทับ อาทิ การพัฒนาแผ่นปิดแผลสามชั้นแบบใหม่สำหรับแผลกดทับโดยเฉพาะด้วยฟองน้ำคอลลาเจน/คาร์ราจีแนน (Collagen/Carrageenan) เป็นวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนในชั้นบนเพื่อช่วยลดแรงกดทับและซ่อมแซมแผล [7] การใช้ที่นอนเจล หมอนรองปุ่มกระดูก หรือผ้าฝอยตัวกับผู้ป่วยที่มีแผลกดทับและมีระดับคะแนน Braden Score น้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 คะแนน [8] และการใช้ที่นอนลมเพื่อป้องกันแผลกดทับซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องด้วยราคาที่ไม่แพง นอกจากนี้ยังมีเตียงที่ช่วยป้องกันแผลกดทับที่ถูกคิดค้นขึ้นโดยนวัตกรรม ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Overview of Related Anti-Bedsore Bed Innovations

Inventor	Functional Description
Komindr [9]	The bed mechanism consists of an outer bed frame, an inner bed frame, and a high-elasticity fabric-stretched bed frame that replaces wooden slats or springs. It can tilt left and right by 0-30 degrees, elevate the head section by 0-45 degrees, and adjust the knee-break section by 0-40 degrees. Operated by a motor with a reduction gear set or a hand crank, it supports a maximum patient weight of 100 kilograms. Controlled via a remote control with an automatic tilting program, it helps patients turn over, sit upright, or change positions.
Utyophas [10]	The bed mechanism consists of two sections: Bed A, which is fixed to the main structure, and Bed B, which moves up and down via a scissor-lift mechanism to alternately support the patient's entire weight without touching the skin. Its operation is controlled by a programmable timer ranging from 1 to 30 minutes, and it is equipped with an electrical leakage protection system and a ventilation system that uses an exhaust fan beneath the bed to draw outside air through the gap between the two beds to replace it.

Table 1 Overview of Related Anti-Bedsore Bed Innovations (continued)

Inventor	Functional Description
Kovitnawong et al. [11]	The bed operates via a mechanical control system located beneath the mattress platform, utilizing linear motors and electric actuators. These components transmit pushing and pulling forces through drive rods, linkage arm assemblies, and multiple pivot points to convert horizontal movement into the adjustment of each sub-section of the mattress platform, which covers the back section, seat section, thigh section, calf section, and foot section. This allows for raising the head and legs, adjusting the tilt angle, and changing sleeping positions to the left and right lateral tilt positions. Additionally, locking devices are integrated to cut off signals or redirect movement to ensure operational safety and stability.
Sittisakuncharoen [12]	The operating mechanism of this adjustable bed utilizes a cylinder or drive mechanism mounted beneath the bed frame, which transmits pushing and pulling forces via linkage arm assemblies and power transmission rods to push and elevate the segmented mattress support platforms in various sections. This enables the backrest, thigh, and foot sections to be adjusted in inclination and folded to change sleeping postures (such as raising the back or legs, or lateral turning) synchronously as required.
Methakanjanasak et al. [13]	The operating mechanism of this adjustable bed relies on support struts and push rods connected between the base frame and the individual platform support frames - namely the backrest, seat, thigh, and foot frames. These components transmit forces and drive loads through hinge pivots and various attachment points to adjust the inclination and elevate each section of the mattress support frame to the desired angles with high stability.

Table 1 Overview of Related Anti-Bedsores Bed Innovations (continued)

Inventor	Functional Description
Mamom [14]	The operating mechanism of this electric turning bed is controlled via a switch panel to command the electric actuators mounted beneath the bed structure, elevating the segmented mattress platform sections to specified angles. The system allows for the independent elevation of either the left or right platform sections to assist in lateral patient turning, or the simultaneous activation of actuators to raise both the backrest and leg sections to achieve sitting or knee - flex postures, thereby facilitating repositioning and preventing pressure ulcers.
Nontakaew et al. [15]	The patient support bed system is controlled via a central circuit to drive an array of grid - arranged weight - shifting cushions through a four -phase vertical movement: starting with all cushions leveled in the first phase, followed by the outer or upper cushion frames lowering to transfer the patient's weight to the inner or lower frames in the second phase, returning the lowered frames to a level plane in the third phase, and finally lowering the inner or upper cushion frames instead to alternate the patient's pressure points. Additionally, the back and leg sections are driven by motors pushing sloping -track supports to guide rollers up and down inclined ramps, while the hip and thigh sections utilize a motor and power - screw mechanism to alternately push and pull the cushion support frames.

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเห็นได้ว่าอุปกรณ์ป้องกันและรักษาแผลกดทับเหล่านี้ต่างมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยแผ่นปิดแผลฟองน้ำคอลลาเจน/คาร์ราจีแนมมีขีดจำกัดในการดูดซับสารคัดหลั่งและจำเป็นต้องเปลี่ยนตามระยะเวลาที่กำหนด ในขณะที่อุปกรณ์กระจายแรงกดทับอย่างพินนอนเจล หมอนรองปุ่มกระดูก และผ้าพยุงตัว แม้จะช่วยลดแรงกดเฉพาะจุดได้ แต่ยังคงต้องอาศัยผู้ดูแลในการพลิกตะแคงตัวผู้ป่วยตามกำหนดอย่างเคร่งครัดเพื่อป้องกันการเกิดแรงเฉือน ส่วนพินนอนลมแม้จะเป็นที่นิยมและมีราคาเข้าถึงง่าย แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากผิวหนังของผู้ป่วยจะสัมผัสกับพินนอนลมตลอดเวลา ทำให้อากาศไม่สามารถถ่ายเทได้สะดวกในบริเวณที่ผิวหนังสัมผัสกับพินนอนลมส่งผลให้เกิดเหี่ยวบริเวณนั้นได้โดยง่าย ซึ่งเหี่ยวจะทำให้อาการของแผลกดทับกำเริบเร็วขึ้น [16] ส่วนระบบกลไกของเตียงป้องกันแผลกดทับแบ่งออกเป็น 2 กลไก ได้แก่

กลไกการพลิกตัวซ้าย-ขวาซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการกระจายน้ำหนักสู่ด้านข้าง แต่มีข้อจำกัดด้านการทำงานแบบเป็นรอบเวลา ทำให้เกิดการสะสมของแรงกดทับในช่วงเวลาระหว่างรอบ และกลไกการลดแรงกดทับโดยตรงซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการตัดวงจรความต่อเนื่องของแรงกดบนเนื้อเยื่อ ผ่านระบบสลับจุดรับน้ำหนักหรือระบายอากาศอัตโนมัติอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องพลิกตะแคงตัวผู้ป่วยทั้งตัว ส่งผลให้สามารถควบคุมระยะเวลาการกดทับของหลอดเลือดฝอยบริเวณปุ่มกระดูกให้อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยได้ตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาด้านการออกแบบพบข้อจำกัดทางกายศาสตร์และสุขอนามัย โดยเฉพาะของ Utyophas [10] มีการเคลื่อนตัวขึ้นลงเฉพาะพื้นเตียง B ส่งผลให้สรีระผู้ป่วยต้องขยับตาม ขณะที่เตียงของ Nontakaew และคณะ [15] มีความซับซ้อนและมีชิ้นส่วนกลไกจำนวนมาก เช่น ชุดเบาะตาราง ระบบมอเตอร์ พาวเวอร์สกรู รางเนินเอียงและล้อเลื่อนซ้อนทับกัน ส่งผลให้เกิดขอกมุ่มอับที่ยากต่อการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ

ด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาเตียงป้องกันแผลกดทับที่อาศัยหลักการลดแรงกดทับโดยตรงเพื่อป้องกันการสะสมของแรงกดทับบริเวณผิวหนัง และลดความซ้ำซ้อนของกลไกเพื่อให้ง่ายต่อการทำความสะอาดได้พื้นเตียงที่อาจก่อให้เกิดจุดสะสมของฝุ่นและเชื้อโรค โดยใช้กลไกการสลับรับน้ำหนักผ่านพื้นเตียง 2 ชุด ที่แยกการทำงานออกจากกันอย่างอิสระ ช่วยให้สรีระของผู้ป่วยไม่ต้องเคลื่อนไหวตามจังหวะการขึ้นลงของพื้นเตียง นอกจากนี้เตียงป้องกันแผลกดทับที่ได้รับการออกแบบและพัฒนายังมีชุดระบายความร้อนได้เตียงที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาเชิงรุกเมื่อเทียบกับเตียงผู้ป่วยทั่วไปที่มักไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ ทำให้เกิดการสะสมของความร้อนและความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเกิดแผลกดทับ ความแม่นยำของระบบนี้เหนือกว่าการใช้พัดลมระบายอากาศแบบปกติที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ส่งผลให้ผู้ป่วยได้รับความสบายมากกว่าและลดโอกาสเกิดความอับชื้นได้อย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งการบูรณาการเทคโนโลยีทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันนี้ ไม่เพียงแต่ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดแผลกดทับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังยกระดับคุณภาพชีวิตและมาตรฐานการดูแลผู้ป่วยติดเตียงในระยะยาวได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ผลงานวิจัยดังกล่าวถือเป็นนวัตกรรมทางการแพทย์ที่พร้อมต่อยอดสู่การใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์และสถานพยาบาล เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้ป่วยติดเตียงและบุคลากรทางการแพทย์ต่อไป

Materials and methods

การวิจัยในครั้งนี้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การออกแบบและสร้างเตียงป้องกันแผลกดทับ และการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบและสร้างเตียงป้องกันแผลกดทับ

เตียงป้องกันแผลกดทับถูกออกแบบตามมาตรฐานเตียงพยาบาลที่มีความกว้าง 130 cm ความยาว 220 cm และมีความสูงจากพื้น 40 cm โดยมีกลไกการทำงานสำคัญคือการใช้เบาะนอน 2 ชุดวางเรียงสลับกัน โดยมีระยะห่างระหว่างเบาะนอน 2 cm ตามมาตรฐาน IEC 80601-2-52 ที่ว่าด้วยเรื่องช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนเคลื่อนไหวได้ของเตียงต้องมีระยะห่างน้อยกว่า 2.5 cm หรือมีระยะที่ปลอดภัยเพื่อป้องกันไม่ให้นิ้วมือ

นิ้วเท้า หรืออวัยวะถูกหนีบขณะขยับปรับเปลี่ยน [17] เพื่อทำหน้าที่สลับจุดรับน้ำหนักของผู้ป่วย ดังแสดงใน Figure 1 ที่เบาะนอนทั้ง 2 ชุดจะเคลื่อนที่ขึ้นลงที่ระยะชัก (Stroke Length: Δy) 10 cm ใช้ความเร็วในการยก 10 s สลับระดับกันรอบละ 15 min ในลักษณะวนลูป จนกว่าจะสั่งหยุดทำงาน ซึ่งใช้เวลาในการสลับจุดรับน้ำหนักของผู้ป่วยน้อยกว่า 2 ชั่วโมงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการพลิกตัวผู้ป่วย [5] เพื่อลดการกดทับสะสมในตำแหน่งเดิม

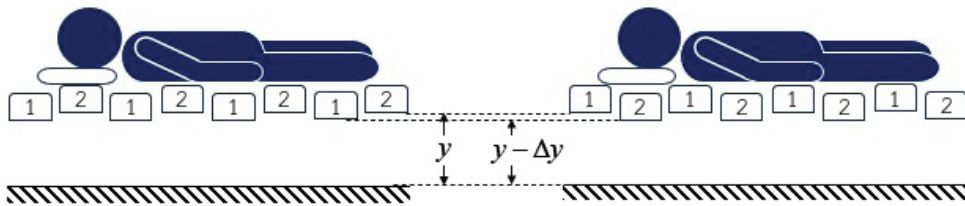


Figure 1 Working Principle of Anti-Bedsore Bed

จาก Figure 1 เห็นได้ว่ากลไกสลับการยกตัวของเบาะนอน 2 ชุด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะความสูง (Δy) ของพื้นผิวสัมผัส ซึ่งเป็นกลไกการลดแรงกดทับเมื่อเบาะนอนชุดหนึ่งลดระดับลง ($y - \Delta y$) พื้นที่รับน้ำหนักของร่างกายส่วนนั้นจะถูกถ่ายเทไปยังเบาะนอนอีกชุดที่ยกตัวขึ้น (y) โดยหลักการนี้เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งแรงกด ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากสมการแรงกดทับดังนี้ [18]

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

เมื่อ P คือ ความดันที่ผิวสัมผัส, F คือ แรงหรือน้ำหนักของร่างกายที่กดลงบนเบาะนอน, และ A คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างร่างกายกับเบาะนอน

จากสมการ (1) เห็นได้ว่า เมื่อเบาะนอนชุดใดชุดหนึ่งลดระดับลง ($y - \Delta y$) จะส่งผลให้แรงกด (F) ระหว่างร่างกายกับเบาะนอนส่วนที่อยู่ตัวมีค่าลดลงเข้าสู่ใกล้ศูนย์ เนื่องจากร่างกายส่วนนั้นลอยตัวพ้นจากพื้นผิวเบาะนอน ส่งผลให้ความดัน (P) ที่กระทำต่อผิวหนังบริเวณดังกล่าวลดลงต่ำกว่าค่าวิกฤตของการปิดกั้นการไหลเวียนเลือดฝอย ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 32 mmHg [19] จึงเป็นการเปิดโอกาสให้เส้นเลือดฝอยกลับมาไหลเวียนได้ตามปกติ โดยที่น้ำหนักรวมของร่างกายจะถูกถ่ายเทไปรองรับยังเบาะนอนอีกชุดหนึ่งที่ยังคงยกตัวอยู่ในระดับ (y) แทน

สำหรับโครงสร้างเตียงป้องกันแผลกดทับประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เตียงชั้นนอก เตียงชั้นใน และชุดระบายความร้อน มีรายละเอียดการออกแบบแต่ละส่วนดังนี้

1. โครงสร้างเตียงชั้นนอก (Outer Bed Frame) เป็นส่วนประกอบที่อยู่กับที่ ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเตียง โดยประกอบด้วยเสาเตียง (Bedpost) ที่ช่วยประคองให้เตียงชั้นในเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้อย่างสมดุล เสริมความแข็งแรงด้วยคานเสาเตียง (Bed Rail) ที่เชื่อมต่อโครงสร้างเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังมีลิ้มิตสวิตช์ (Limit Switch) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และแม่แรงไฟฟ้า เพื่อควบคุมจังหวะการเคลื่อนที่ขึ้นลงและรักษาความขนานของพื้นเตียงกับแนวระนาบอยู่เสมอ ทั้งนี้โครงสร้างเตียงชั้นนอกแสดงไว้ใน Figure 2

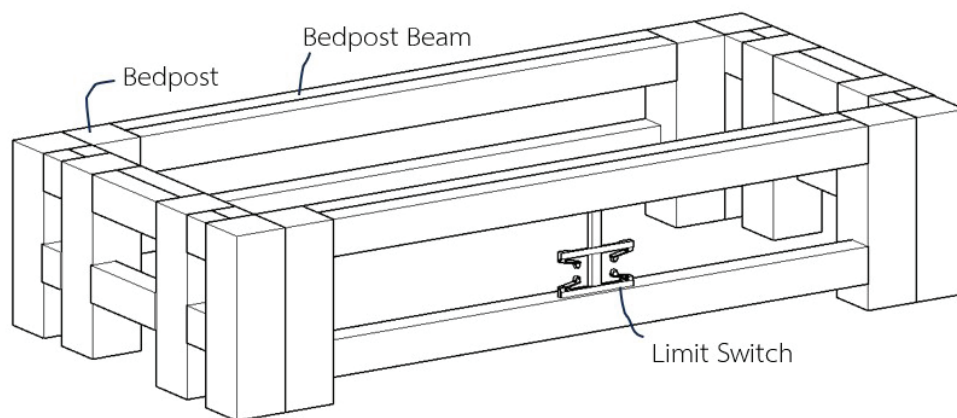


Figure 2 Positioning of Outer Bed Frame Components

2. โครงสร้างเตียงชั้นใน (Inner Bed Frame) เป็นส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ แบ่งออกเป็น 2 ชุดแยกจากกันอย่างชัดเจน เพื่อทำหน้าที่ยกสลับระดับกัน ประกอบด้วยพื้นเตียง (Mattress Base) รูปตัวยูที่เว้นระยะห่างเพื่อระบายอากาศ เสาพื้นเตียง (Mattress Base Leg) ที่ช่วยรับน้ำหนักและป้องกันการชนกันของโครงสร้างทั้งสองชุด และคานพื้นเตียง (Mattress Base Support Beam) ที่ทำหน้าที่ถ่ายแรงไปยังจุดรองรับ โดยมีการแบ่งจุดรับแรงออกเป็นสองส่วน คือ จุดรับแรงในแนวนอนซึ่งใช้ลูกกลิ้ง (Fixed Caster Wheel) วิ่งบนเสาเตียงเพื่อรักษาความสมดุลและป้องกันการเคลื่อนที่ และจุดรับแรงในแนวตั้งซึ่งใช้คานรับน้ำหนัก (Load Bearing Beam) ใต้คานพื้นเตียงรองรับน้ำหนักทั้งหมด ในด้านการขับเคลื่อนจะใช้แม่แรงไฟฟ้าแบบกรรไกร (Electric Scissor Jack) ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) โดยอาศัยจุกคาน (Beam Cantilever) ที่ยื่นออกมาจากคานรับน้ำหนักไปกดลิมิตสวิตช์เพื่อเปลี่ยนสถานะทางไฟฟ้าและสั่งการให้แม่แรงยกเตียงขึ้นลงได้อย่างแม่นยำตามจังหวะที่กำหนด ทั้งนี้โครงสร้างเตียงชั้นในแสดงไว้ใน Figure 3

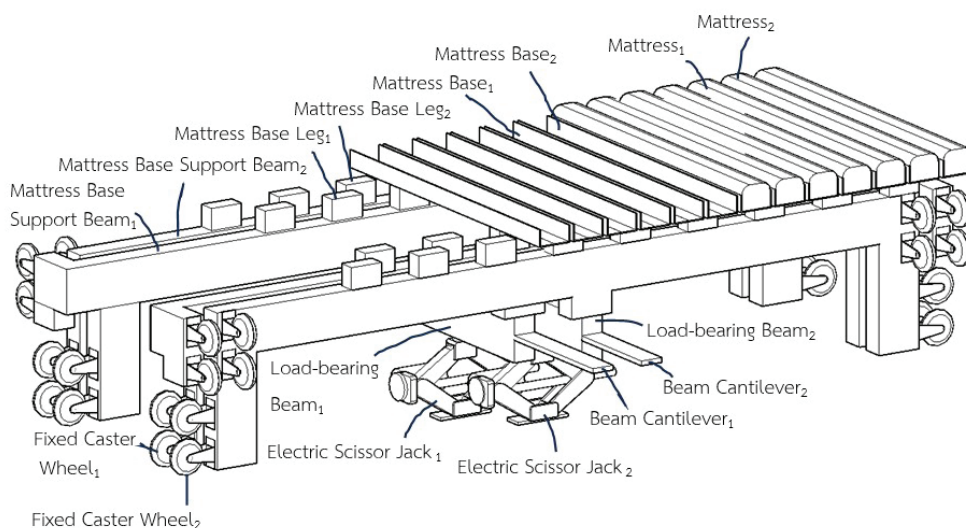


Figure 3 Positioning of Inner Bed Frame Components

3. ชุดระบายความร้อน (Cooling Unit) ถูกออกแบบมาติดตั้งได้เพียง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างกระแสลมพัดผ่านช่องว่างระหว่างพื้นเตียงขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งการทำงานลักษณะนี้จะช่วยให้ผิวหนังของผู้ป่วยในบริเวณที่ถูกกดทับมีการถ่ายเทอากาศอย่างต่อเนื่อง และช่วยลดการสะสมความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างร่างกายกับเบาะนอน สำหรับชุดระบายความร้อนที่ทำการออกแบบจะใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งเป็นระบบควบคุมความเร็วรอบของพัดลมแบบอัตโนมัติ กล่าวคือ สามารถปรับแรงลมอัตโนมัติด้วยการเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของพัดลมตามสภาพอุณหภูมิอากาศโดยรวม

ทั้งนี้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วลมของพัดลม ระบบไม่ได้ใช้เพียงแค่อุณหภูมิอากาศเท่านั้น แต่ได้นำค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity: HR) ได้เพียงมาร่วมประมวลผลแบบเรียลไทม์ผ่านเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นแบบหัววัด (Probe) โดยค่าความชื้นและอุณหภูมิดังกล่าวจะถูกนำมาคำนวณผ่านสมการอุณหภูมิประสิทธิผลปกติ (Normal Effective Temperature: NET) ดังแสดงในสมการ (2) ตามแนวทางของ Missenard [20] เพื่อให้ระบบควบคุมแบบพีไอดี นำค่าความเร็วลมเป้าหมายไปปรับเปลี่ยนความเร็วรอบพัดลมโดยอัตโนมัติ กลไกนี้จึงทำหน้าที่เสมือนระบบควบคุมสภาวะความสบายเชิงรุกที่ช่วยระบายความร้อนและลดความอับชื้นจากห้องบริเวณผิวสัมผัสของผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องอาศัยกลไกการเพิ่ม-ลดความชื้นโดยตรง

$$NET = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014RH + \frac{1}{1.76 + 1.4v^{0.75}}} - 0.29T(1 - 0.01RH) \quad (2)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}\text{C}$), คือ RH ความชื้นสัมพัทธ์ (%), และ v คือ ความเร็วลม (ms^{-1})

จากสมการ (2) เป็นการนำค่า NET มาใช้แทนสภาวะความสบายของผู้ป่วย (T_{comfort}) ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าผู้ป่วยอยู่ในสภาวะพักนอน เป็นช่วงที่อัตราการเมแทบอลิซึมต่ำ (Low Metabolic Rate) และช่วงค่า NET ที่คำนวณได้สะท้อนถึงอุณหภูมิที่ร่างกายสัมผัสจริง ซึ่งสามารถนำไปใช้กำหนดช่วงสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการฟื้นตัวของผู้ป่วยได้ ดังนั้นจากสมการ (2) สามารถเขียนเป็นสมการใหม่เพื่อหาค่าความเร็วลมของพัดลมที่ต้องการอุณหภูมิที่รู้สึกสบายได้เป็น

$$v = 0.64 \left(\frac{37 - T_{\text{comfort}} - 0.29T(1 - 0.01RH)}{37 - T} - 3.23 + \frac{1}{0.0014RH} \right)^{4/3} \quad (3)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจาก Figure 1 ระยะห่าง y ที่เปลี่ยนเป็น $y - \Delta y$ จะส่งผลโดยตรงต่อระยะพ่นลมซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันปะทะที่ผิวหนังผู้ป่วย โดยความเร็วของกระแสลมที่กระทบผิวตามระยะห่างที่เปลี่ยนไปสามารถประมาณได้จากสมการการไหลของของไหลหนืดผ่านช่องเปิดได้ดังนี้

$$v = v_0 \left(\frac{d}{y - \Delta y} \right) \quad (4)$$

โดยที่ v_0 คือ ความเร็วต้นที่ออกจากพัดลม (ms^{-1}), d คือ ขนาดช่องว่างของช่องลม ซึ่งมีค่า 1×10^{-2} m, และ $y - \Delta y$ คือ ระยะห่างช่องว่างระหว่างเบาะนอนที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีค่า 10×10^{-2} m

เมื่อนำสมการที่ (3) และ (4) มาบูรณาการเข้าด้วยกัน จะสามารถสร้างสมการเป้าหมายสำหรับการควบคุมความเร็วต้นที่ออกจากพัดลม (v_0) ซึ่งเป็นค่าที่ระบบควบคุมแบบพีไอดีจะต้องสั่งการ ได้ดังนี้

$$v_0 = \frac{f(T, RH)(y - \Delta y)}{d} \quad (5)$$

โดยค่าความเร็วต้นที่ออกจากพัดลม (v_0) ที่คำนวณได้จากสมการ (5) จะถูกใช้เป็นค่าเป้าหมายในการสั่งการพัดลมระบายความร้อน เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริง ทั้งอุณหภูมิอากาศ (T) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ได้เพียง โดยระบบใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นแบบหัววัด ซึ่งติดตั้งสอดแทรกระหว่างพื้นเตียงเพื่อจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ส่งไปยังระบบควบคุมแบบพีไอดี ดังแสดงหลักการทำงานใน Figure 4

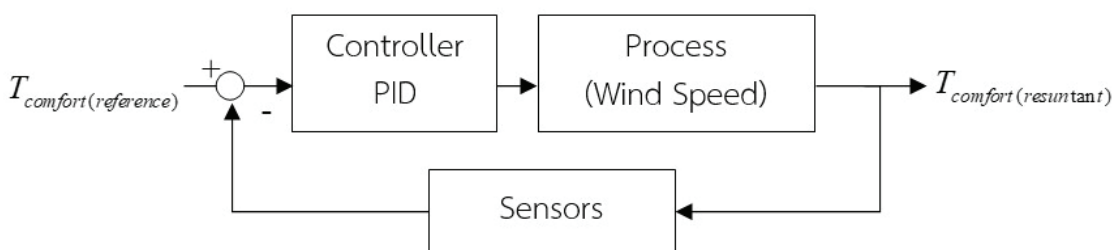


Figure 4 Operational Diagram of the Cooling Control System

จาก Figure 4 ที่แสดงพฤติกรรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Loop) เริ่มจากการตรวจสอบค่าตัวแปรกระบวนการโดยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งสัญญาณจะถูกส่งมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน (Error) จากนั้นระบบควบคุมแบบพีไอดี จะประมวลผลผ่าน 3 ส่วนประกอบ ได้แก่ Proportional (P) เพื่อลดความผิดพลาดปัจจุบัน, Integral (I) เพื่อกำจัดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady State Error), และ Derivative (D) เพื่อลดการแกว่ง (Overshoot) และเพิ่มเสถียรภาพ ก่อนที่สัญญาณเอาต์พุตจะถูกส่งไปควบคุมความเร็วรอบของพัดลมเพื่อรักษาอัตราการระบายความร้อนให้สอดคล้องกับสภาวะความสบายของผู้ป่วยอย่างต่อเนื่อง

สำหรับต้นแบบเตียงป้องกันแผลกดทับที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้น ดังแสดงใน Figure 5 โครงสร้างของเตียงแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักตามการออกแบบ ได้แก่ โครงสร้างส่วนนอก โครงสร้างส่วนใน และชุดระบายความร้อน โดยการออกแบบและสร้างเตียงดังกล่าวได้คำนึงถึงข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องมือแพทย์ตามมาตรฐาน IEC 60601-1 [21]



Figure 5 Anti-Bedsore Bed Prototype

ทั้งนี้เตียงป้องกันแผลกดทับนี้ใช้กลไกการสลับจุดรับน้ำหนักเพื่อบรรเทาแรงกดทับบนร่างกายผู้ป่วย โดยใช้ชุดเบานอนจำนวน 2 ชุด ที่ได้รับการออกแบบให้มีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงสลับกันโดยอัตโนมัติ ซึ่งมีรายละเอียดการทำงาน ดังแสดงใน Figure 6



Figure 6 Operation of the Anti-Bedsore Bed System

การทดสอบประสิทธิภาพเตียงป้องกันแผลกดทับ

กระบวนการทดสอบประสิทธิภาพของเตียงป้องกันแผลกดทับแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก โดยในขั้นตอนแรกเป็นการประเมินสมรรถนะทางกายภาพและระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเตียงร่วมกับการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของชุดระบายความร้อนที่ใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี เมื่อดำเนินการทดสอบในขั้นตอนแรกเสร็จสมบูรณ์แล้ว จึงเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งเป็นการทดสอบเชิงประจักษ์ด้านความรู้สึกและความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อสภาวะความสบายและการใช้

งานเตียงป้องกันแผลกดทับในสถานการณ์จริง ทั้งนี้รายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. การทดสอบการรับน้ำหนักของเตียงป้องกันแผลกดทับ

การทดสอบประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของเตียงป้องกันแผลกดทับดำเนินการโดยประยุกต์ใช้หลักการวัดความโน้มเอียง เพื่อประเมินค่าการโก่งตัวของพื้นเตียงที่มีลักษณะเป็นคานาดังแสดงใน Figure 7 โดยใช้เครื่องวัดมุมองศาแบบดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.1 องศา เนื่องจากมีความเสถียรสูง เหมาะกับการทดสอบรับน้ำหนักต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน และสามารถแปลงค่ามุมลาดเอียงเป็นระยะการโก่งตัวได้อย่างแม่นยำตามหลักทฤษฎีคาน ด้วยการติดตั้งไว้บริเวณใต้พื้นเตียงเพื่อบันทึกค่ามุมการหมุนในแนวดิ่ง ขั้นตอนการเก็บข้อมูลจะใช้วิธีทดสอบแบบน้ำหนักรวมศูนย์ (Concentrated Load) บริเวณกึ่งกลางพื้นเตียง เป็นการจำลองภายใต้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อประเมินกรณีที่เลวร้ายที่สุด เนื่องจากภาระแบบจุดจ่อกึ่งกลางคานจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวสูงสุด มากกว่าการกระจายน้ำหนัก (Distributed Load) ภายใต้ น้ำหนักรวมที่เท่ากัน โดยการทดสอบจะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกแบบขึ้นบันไดตั้งแต่ 0, 50, 100 จนถึง 150 kg และคงน้ำหนักไว้ต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมงในแต่ละกรณี ซึ่งเป็นระยะเวลาต่อเนื่องที่เพียงพอต่อการตรวจสอบพฤติกรรมการเสียรูปของคานภายใต้สภาวะคงที่ อีกทั้งยังสอดคล้องกับระยะเวลามาตรฐานเทียบเท่ารอบการนอนหลับพักผ่อนของมนุษย์ใน 1 วัน โดยกรณีที่ 1 เปิดระบบสลับชุดพื้นเตียงรับน้ำหนักตามกลไกป้องกันแผลกดทับ และกรณีที่ 2 เป็นการให้พื้นเตียงชุดเดียวรับน้ำหนักตลอดระยะเวลาการทดสอบ

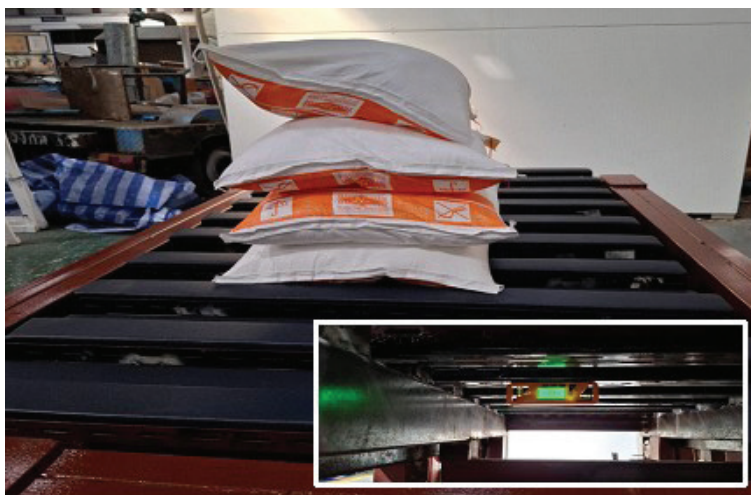


Figure 7 Testing Method for Load-Bearing Capacity of the Anti-Bedsore Bed

ทั้งนี้ค่ามุมที่วัดได้จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าการโก่งตัวสูงสุด (Maximum Deflection: δ_{max}) ดังแสดงใน Figure 8 และอาศัยสมการดังนี้

$$\delta_{max} = L' \tan(\theta) \quad (6)$$

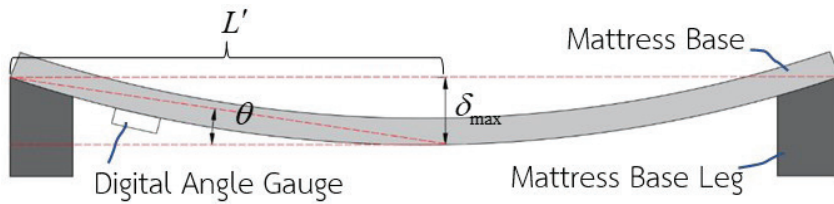


Figure 8 Method for Determining Structural Deflection of the Mattress Base

โดยค่า δ_{max} ที่คำนวณได้จะถูกนำไปตรวจสอบเทียบกับค่ามาตรฐานการโก่งตัวของคานที่ระดับวิกฤต ($\delta_{critical}$) ซึ่งเป็นการออกแบบโครงสร้างเพียงที่คำนึงถึงหลักวิศวกรรมกลศาสตร์และการรับน้ำหนักสูงสุด 150 kg โดยการกำหนดให้การโก่งตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกทุกจรไม่ควรเกิน $\delta_{critical} = L / 360$ ดังนั้นพื้นเตียงของเตียงป้องกันแผลกดทับที่มีความยาว 1 เมตร ค่า $\delta_{critical}$ จึงไม่ควรเกิน 2.7 mm ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าเผื่อความปลอดภัย (Safety Factor: SF) ของการโก่งตัว ซึ่งคำนวณจากสมการดังนี้ [22]

$$SF = \frac{\delta_{critical}}{\delta_{max}} \quad (7)$$

โดยค่า SF ควรมีค่ามากกว่า 2.5 เพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างมีความมั่นคงแข็งแรง ปลอดภัย และมีค่าเผื่อเพียงพอสำหรับการรับน้ำหนักสูงสุดตามที่ออกแบบไว้ตามมาตรฐาน IEC 60601-1 [21]

2. การทดสอบชุดระบบระบายความร้อน

การทดสอบชุดระบบระบายความร้อนได้้เพียง เป็นการศึกษาค้นคว้าผลตอบสนองต่ออุณหภูมิเป้าหมาย ซึ่งในการกำหนดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานระบบ จำเป็นต้องพิจารณาจากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับโซนความสบายและความต้องการของผู้ใช้งาน โดย Jitkhajornwanich [23] ได้ศึกษาการเปลี่ยนผ่านโซนความสบายของคนไทยในสภาพแวดล้อมร้อนชื้น พบว่าโซนความสบายอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25.6 – 31.5 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 62.2% – 90.0% ขณะที่ Taweekun [24] ศึกษาโซนความสบายทางความร้อนพบว่า ค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50% – 70% และอุณหภูมิประสิทธิภาพ (ET) 24 – 27 °C ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของเกณฑ์ความสบายตามบริบทการอยู่อาศัย นอกจากนี้ในมิติของคุณภาพการนอนหลับ Zheng [25] ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิห้องต่อการนอน พบว่าอุณหภูมิที่ 28 °C ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสงบและคุณภาพการนอนหลับ ขณะเดียวกันในมุมมองด้านสุขอนามัยสำหรับผู้ป่วยติดเตียงหรือการใช้งานระยะยาว ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 40 – 60 RH เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของไวรัสในอากาศแห้ง และยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ไรฝุ่น หรือแบคทีเรียอันเป็นสาเหตุของโรคระบบทางเดินหายใจ [26]

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น แม้ช่วงความสบายหรืออุณหภูมิในแต่ละงานวิจัยจะมีความแตกต่างกันตามบริบทการทดลอง แต่งานวิจัยนี้ได้บูรณาการระหว่างเกณฑ์ความสบายในการนอนหลับและมาตรฐานด้านสุขอนามัยเข้าด้วยกัน จึงเลือกกำหนดค่าอุณหภูมิเป้าหมายไว้ที่ 28 °C ตามเกณฑ์การนอนหลับของ Zheng

[25] และกำหนดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ไว้ที่ 60% ซึ่งเป็นจุดตัดที่อยู่ในเกณฑ์ความสบายของ Taweekun [24] และอยู่ในขอบเขตความปลอดภัยด้านสุขภาพ (40% – 60% RH) เพื่อให้ระบบระบายความร้อนได้ดียิ่งสามารถรักษาสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยที่สุดสำหรับผู้ป่วย [26]

ส่วนวิธีการทดสอบจะทำการจำลองอุณหภูมิโดยรอบไว้ที่ประมาณ 33 °C และติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกันน้ำรุ่น DS18B20 (ความแม่นยำ ± 0.5 °C) ไว้บริเวณใกล้พื้นเตียงเพื่อวัดค่าอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ จากนั้นระบบจะคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิเป้าหมาย เพื่อให้ระบบควบคุมแบบพีไอดี ประมวลผลและสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) สำหรับปรับความเร็วรอบของพัดลม โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบพีไอดี ได้รับการปรับจูนด้วยวิธีการปรับตั้งค่าด้วยตนเอง [27-28] ดังแสดงใน Figure 9



Figure 9 Experimental Setup for PID Tuning and PWM Fan Speed Control Testing

สำหรับการพิจารณาผลการทดสอบจะพิจารณาที่ผลตอบสนองทางเวลาที่รวดเร็วของระบบ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การเกิน (Percentage Overshoot: %OS) เวลาหน่วง (Time Delay: T_d) กำหนดจากเวลาที่ผลตอบสนองมีขนาดเป็น 50% ของค่าสุดท้าย เวลาตอบสนอง (Rise Time: T_r) เป็นเวลาที่วัดจากอัตราความลาด (Slop) ณ เวลาที่ผลตอบสนองมีขนาดเป็น 50% ของค่าสุดท้ายแทน ช่วงเวลาที่ผลการตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าสุดท้าย (Setting Time: T_s) เป็นค่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของระบบควบคุมแบบปิดเพื่อเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady State) ภายในช่วงความคลาดเคลื่อนที่กำหนด 5% ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเร็วและความเสถียรในการทำงานของระบบ และความคลาดเคลื่อนสภาวะคงตัว (Steady State Error: e_{ss}) คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิเป้าหมายกับอุณหภูมิที่วัดได้เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนสภาวะคงตัวได้เป็น [27-28]

$$e_{ss} = X(t) - Y(t) \quad (8)$$

เมื่อ $X(t)$ คือ อุณหภูมิเป้าหมาย และ $Y(t)$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้

3. การศึกษาความรู้สึกของผู้ใช้เตียงป้องกันแผลกดทับ

การศึกษาความรู้สึกของผู้ใช้เตียงป้องกันแผลกดทับดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอาสาสมัครร่างกายปกติที่มีอายุมากกว่า 30 ปี ในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลกและใกล้เคียง จำนวน 40 คนที่ได้จากการสุ่มแบบเจาะจง แบ่งตามเพศชายและหญิงกลุ่มละ 20 คน และแบ่งย่อยตามค่าดัชนีมวลกาย (BMI) 5 ระดับตามเกณฑ์อ้างอิงขององค์การอนามัยโลก (WHO) ในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก [29] โดยแบ่งระดับละ 8 คน เครื่องมือที่ใช้คือแบบสัมภาษณ์ซึ่งเป็นแบบมีโครงสร้างที่ใช้คำถามเหมือนกันทุกคน โดยขั้นตอนจะให้อาสาสมัครนอนบนเตียงเป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงใน Figure 10 เพื่อให้อธิบายถึงความรู้สึกในขณะทีนอนบนเตียงที่กำลังทำงานตามคำถามจากแบบสัมภาษณ์



Figure 10 Testing of an Anti-Bedsores Bed with Human Volunteers

ทั้งนี้ งานวิจัยผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ (COA No. 024/2025) เป็นที่เรียบร้อย ซึ่งการประเมินความรู้สึกจะกำหนดเกณฑ์การให้คะแนน 5 ระดับ ตั้งแต่ 0 ถึง 4 โดย 0 หมายถึงไม่มีความรู้สึกเลย และ 4 หมายถึงมีความรู้สึกมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้ค่าคะแนนเริ่มต้นที่ศูนย์สามารถสะท้อนสภาวะที่ผู้ใช้งานไม่มีความรู้สึกต่อสิ่งเร้าหรือกลไกนั้นได้อย่างแท้จริง ซึ่งสอดคล้องกับการประเมินอาการทางกายภาพในสถานะปกติ อีกทั้งยังช่วยป้องกันความคลาดเคลื่อนในการแปลผลความรู้สึกระดับต่ำสุดเมื่อเทียบกับการใช้สเกลเริ่มต้นที่ 1 โดยมีการกำหนดช่วงความหมายของค่าเฉลี่ยไว้อย่างชัดเจน คือ

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.00 – 0.80 หมายถึง มีความรู้สึกน้อยที่สุด

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.81 – 1.60 หมายถึง มีความรู้สึกน้อย

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 1.61 – 2.40 หมายถึง มีความรู้สึกปานกลาง

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 2.41 – 3.20 หมายถึง มีความรู้สึกมาก

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 3.21 – 4.00 หมายถึง มีความรู้สึกมากที่สุด

พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างความรู้สึกจำแนกตามเพศด้วย Independent Samples t-test: t) และจำแนกตามดัชนีมวลกายด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA: F) ดังแสดงในสมการ (9) และสมการ (10) [30]

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (9)$$

เมื่อ $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และ 2, S_1^2, S_2^2 คือ ความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และ 2, และ n_1, n_2 คือ จำนวนข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่ 1 และ 2

$$F = \frac{MSb}{MSw} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{N}}{k-1} \cdot \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \frac{T^2}{N} \right) - \left(\sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{N} \right)} \cdot \frac{1}{N-k} \quad (10)$$

เมื่อ MSb คือ ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม, MSw คือ ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนภายในกลุ่ม, T_i คือ ผลรวมในกลุ่มที่ i , T คือ ผลรวมทั้งหมด, n_i, n_j คือ จำนวนตัวอย่างในกลุ่มที่ i และ j , N คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด, k คือ จำนวนตัวแปรทั้งหมด, และ X_{ij} คือ ค่าของตัวอย่างที่ i ในตัวแปรที่ j

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความแตกต่างกันเป็นรายคู่ว่ามีความสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยจะทำการวิเคราะห์ต่อเมื่อผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ออกมาว่ากลุ่มต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในสมการดังนี้ [30]

$$Sf = \sqrt{(k-1)F_{(a,k-1,N-k)}} \sqrt{MSw \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_j} \right)} \quad (11)$$

โดยที่ $F_{(a,k-1,N-k)}$ ได้มาจากการเปิดตาราง F ที่ $\alpha = .05, df_1 = k-1, df_2 = N-k$

Results and Discussion

ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเตียงป้องกันแผลกดทับ

ผลการทดสอบรับน้ำหนักของเตียงป้องกันแผลกดทับที่ทำจากเหล็กฉากประกบคู่เป็นรูปตัวยาว 1 m เมื่อทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 150 kg เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าการทดสอบในรูปแบบที่ 1 (การสลับชุดพื้นเตียงรับน้ำหนัก) มีค่า δ_{max} อยู่ที่ 0.096 mm และการทดสอบในรูปแบบที่ 2 (การใช้พื้นเตียงชุดเดียวรับน้ำหนักตลอดการทดสอบ) มีค่า δ_{max} อยู่ที่ 0.236 mm ซึ่งทั้งสองรูปแบบมีค่า SF อยู่ในเกณฑ์สูงและผ่านการทดสอบในทุกระดับน้ำหนัก ดังแสดงผลการทดสอบไว้ใน Table 2

Table 2 Weight Bearing Test Results of the Anti-Bedsores Bed

Live Load (kg)	รูปแบบที่ 1			รูปแบบที่ 2		
	δ_{max} (mm)	SF	Test Results	δ_{max} (mm)	SF	Test Results
0	0.00	-	Pass	0.00	-	Pass
50	0.00	-	Pass	0.44	6.14	Pass
100	0.017	158.82	Pass	0.113	23.89	Pass
150	0.096	28.12	Pass	0.236	11.44	Pass

จากผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเตียงป้องกันแผลกดทับ แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของเตียงที่สร้างขึ้นมีความแข็งแรงและทนทานสูง โดยรูปแบบที่ 1 ให้ค่าการโก่งตัวน้อยกว่ารูปแบบที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างพื้นเตียงช่วยให้เกิดการถ่ายเทและกระจายแรงกระทำไปยังโครงสร้างส่วนข้างเคียงได้อย่างทั่วถึง ลดการสะสมของความเค้นเฉพาะจุดบนคานหลักด้วยเพียงชุดเดียว ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความสามารถในการต้านทานการโก่งตัวได้ดีกว่า และช่วยยืดอายุการใช้งานของกลไกพื้นเตียงในสภาพการใช้งานจริงระยะยาว นอกจากนี้การยึดปลายทั้งสองด้านกับเสาพื้นเตียงอย่างหนาแน่นแบบ Fixed Support ช่วยลดระยะการโก่งตัวได้ดีกว่าการวางพาดแบบอิสระ ซึ่งตรงตามทฤษฎีคานของออยเลอร์-แบร์นูลลี (Euler-Bernoulli Beam Theory) ที่ว่าโครงสร้างที่มีการยึดรั้งที่ปลายแบบ Fixed Support จะช่วยจำกัดการหมุนและการเคลื่อนตัว ทำให้ค่าการโก่งตัวลดลง เมื่อเทียบกับการวางพาดแบบอิสระภายใต้ภาระบรรทุกเหมือนกัน [31] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rodrigo and Sewwandhi [32] ที่ได้เปรียบเทียบรูปแบบการโก่งตัวของโครงสร้างคาน 2 รูปแบบ คือ คานแบบจุดรองรับเรียบง่ายและคานแบบยึดแน่น โดยใช้ทฤษฎีคานของออยเลอร์-แบร์นูลลี ร่วมกับอนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า คานแบบยึดแน่นมี δ_{max} น้อยกว่าคานแบบจุดรองรับเรียบง่ายอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อรับแรงกระทำที่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้เองโครงสร้างเตียงป้องกันแผลกดทับที่ถูกสร้างขึ้นจึงมีความมั่นคงสูงและมีอัตราส่วนความปลอดภัย (SF) อยู่ในเกณฑ์สูงเพียงพอต่อการใช้งานจริงในผู้ป่วย

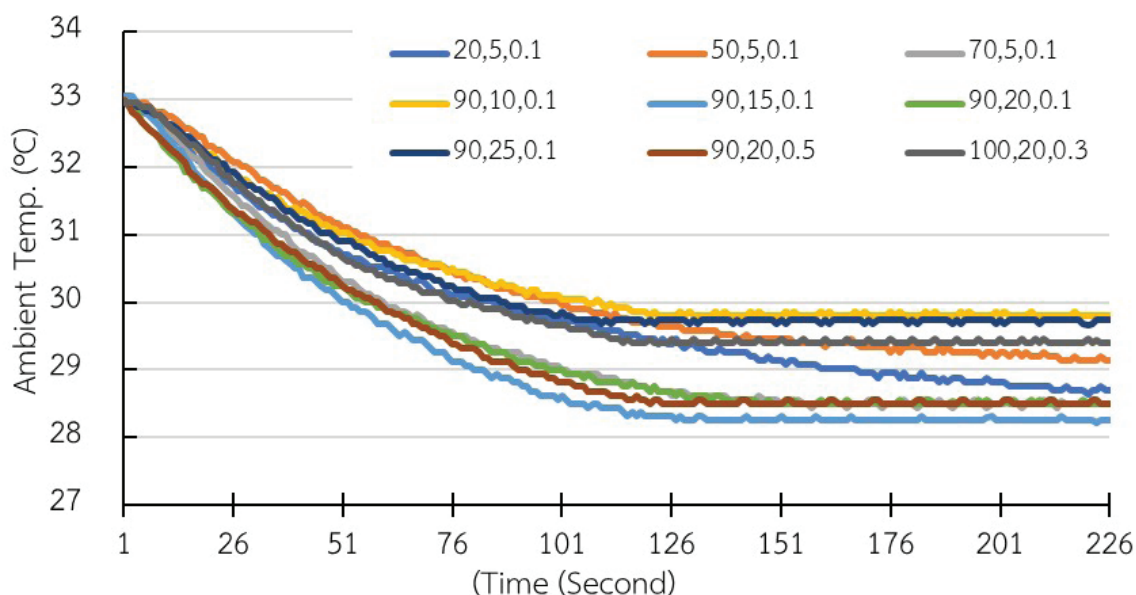
ผลการทดสอบชุดระบบระบายความร้อน

ผลการทดสอบชุดระบบระบายความร้อนเป็นการปรับหาค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมแบบพีไอดี (K_p , K_i และ K_d) ที่เหมาะสม แสดงไว้ใน Table 3

Table 3 Results of Determining Optimal PID Control Parameters

K_p, K_i, K_d	%OS	T_d (s)	T_r (°C/s)	T_s (s)	$e_{ss@ 28\text{ }^{\circ}\text{C}}$ (°C)
20,5,0.1	0.00	27.6	0.076	121.2	0.70
50,5,0.1	0.00	31.2	0.069	124.2	1.13
70,5,0.1	0.00	24	0.094	87.6	0.50
90,10,0.1	0.00	22.2	0.067	71.4	1.79
90,15,0.1	0.00	21	0.101	75	0.25
90,20,0.1	0.00	21.6	0.083	86.4	0.50
90,25,0.1	0.00	42.6	0.072	61.2	1.74
90,20,0.5	0.00	22.8	0.086	73.2	0.50
100,20,0.3	0.00	22.8	0.082	67.8	1.39

จาก Table 3 เห็นได้ว่า ทุกชุดการทดลองของค่าพารามิเตอร์ (K_p , K_i และ K_d) มีค่า %OS อยู่ที่ 0.00 แสดงถึงระบบตอบสนองเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างราบรื่นโดยไม่มีการแกว่งเกิน ส่วนพารามิเตอร์ (K_p , K_i และ K_d) ที่ทำให้ชุดระบบระบายความร้อนทำงานได้ดีที่สุด คือ 90,15,0.1 โดยใช้เวลานาน 21 s เวลาตอบสนองที่คิดเป็นค่าความชัน -0.101 °C/s เวลาการตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าสุดท้าย 75 s และค่าความคลาดเคลื่อนสภาวะคงตัว 0.25 °C ทั้งนี้ผลการทดสอบชุดระบบระบายความร้อนด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี แสดงใน Figure 11

**Figure 11** System Response at a Setpoint of 28 °C

จาก Figure 11 แสดงแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิภายใต้เงื่อนไขพารามิเตอร์และค่าสัมประสิทธิ์ระบบควบคุมแบบพีไอดีที่แตกต่างกันจนเข้าสู่จุดคงที่ ซึ่งเงื่อนไข 90,15,0.1 สามารถลดอุณหภูมิลงได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเป้าหมายมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีการจูนระบบควบคุมแบบพีไอดี [27] ตามแนวทางของ *NET* ซึ่งใช้ประเมินटरชนิดความสบายของมนุษย์ [20] ภายใต้สภาพอากาศจริง โดยการกำหนดค่า K_p ในระดับที่สูงถึง 90 ช่วยเพิ่มอัตราตอบสนองเชิงความร้อนของระบบให้มีค่าความชันเท่ากับ $-0.101\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ เนื่องจากสัญญาณควบคุมในส่วนของคุณค่าสัดส่วนที่ส่งไปสั่งการอุปกรณ์ ($u_p(t)$) แปรผันตรงกับขนาดความผิดพลาด $e(t)$ ตามสมการ $u_p(t) = K_p \cdot e(t)$ ส่งผลให้พัดลมทำงานด้วยกำลังสูงสุดในทันทีที่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ทำให้ลดอุณหภูมิลงมาใกล้เคียงกับอุณหภูมิเป้าหมาย ($28\text{ }^{\circ}\text{C}$) ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการควบคุมด้วยค่าสัดส่วนเพียงอย่างเดียวจะทำให้เกิดปัญหา Offset หรือความคลาดเคลื่อนคงที่อันเนื่องมาจากสมดุลความร้อน ระหว่างระบบระบายความร้อนกับอุณหภูมิแวดล้อม การเพิ่มค่า $K_i = 15$ เข้ามา จะทำหน้าที่สะสมผลรวมความผิดพลาดตามเวลา เพื่อเพิ่มแรงขับในส่วนเอาต์พุตในการขจัด Offset ทั้งนี้ค่า $K_i = 15$ ถือเป็นค่าที่เหมาะสมกับค่าคงตัวเวลาเชิงความร้อนของระบบ เนื่องจากหากใช้ค่า K_i ต่ำเกินไปจะทำให้แก้ Offset ได้ช้า หรือหากสูงเกินไปจะเกิดปรากฏการณ์การสะสมพลังงานสัดส่วนล้นจนทำให้ระบบมีการตอบสนองช้าลงและมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง นอกจากนี้การนำส่วนอนุพันธ์เข้ามาเสริมเพื่อทำหน้าที่ประเมินแนวโน้มอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพื่อสร้างแรงต้านชะลอการเย็นตัวของระบบเมื่อเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย ส่งผลให้ระบบไม่มีการฟุ้งเกินเป้าหมายหรือการแกว่งตัว ($\%OS = 0$) เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิแกว่งหรือลดต่ำกว่าค่าเป้าหมาย ซึ่งอาจกระทบต่อความสบายตัวของผู้ป่วยติดเตียง ซึ่งประสิทธิภาพของการควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี ได้รับการยืนยันจากงานวิจัยของ Valentina et al. [33] ที่ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี เพื่อรักษาเสถียรภาพอุณหภูมิในถังต้มน้ำแบบมีใบพัดกวน ซึ่งพบว่าตัวควบคุมสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วและรักษาความคงที่ของอุณหภูมิในสภาวะคงที่ โดยมีค่า $\%OS$ ต่ำกว่า 0.12% ซึ่งจากผลการอภิปรายข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการบูรณาการค่าความชันสัมพัทธ์เข้ากับการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี ช่วยให้ชุดระบายความร้อนสามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมจริงได้ดียิ่งขึ้นอย่างแน่นอน เมื่อเปรียบเทียบกับที่นอนลมทั่วไปที่มีกंपาระบบปัญหาการสะสมของเหงื่อและความอับชื้น ระบบระบายความร้อนที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถปรับความเร็วลมเพื่อติดตามความชื้นและระบายความร้อนออกจากบริเวณจุดสัมผัสได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยรักษาอุณหภูมิเป้าหมายให้คงที่โดยปราศจากการแกว่งของอุณหภูมิ แต่ยังช่วยลดปัจจัยเสี่ยงด้านความอับชื้นอันเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดแผลกดทับได้อย่างเป็นรูปธรรมอีกด้วย

ผลการศึกษาความรู้สึกของผู้ใช้เตียงป้องกันแผลกดทับ

การศึกษานี้ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเตียงป้องกันแผลกดทับจากความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยทดสอบกับอาสาสมัครสุขภาพดีจำนวน 40 คน ดังผลการศึกษาใน Table 4 และ Table 5

Table 4 Comparison of User Perceptions of the Anti-Bedsores Bed Categorized by Sex

Item	Sex				t	p
	Male (N=20)		Female (N=20)			
	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.		
1. Perception of the bed's upward and downward movement	0.85	0.75	1.05	0.60	0.93	0.36
2. Perception of vibration during the operation of the bed	1.50	0.76	1.75	0.64	1.13	0.27
3. Perception of any physical discomfort while lying on the bed	0.65	0.88	0.95	0.83	1.12	0.27
4. Perception of heat sensation on the skin surface in contact with the mattress	1.05	0.89	1.30	1.13	0.78	0.44
Total Average	1.01	0.82	1.26	0.80	1.28	0.21

* Statistical significance was set at the 0.05 level

จาก Table 4 เมื่อพิจารณาเฉพาะเพศชาย เห็นได้ว่าในภาพรวมอาสาสมัครเพศชายมีความรู้สึกต่อการทำงานของเตียงป้องกันแผลกดทับอยู่ในระดับความรู้สึกน้อย ($\bar{X} = 1.01$, S.D.=0.82) และเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่าข้อคำถามที่มีความรู้สึกน้อยที่สุด คือ ความรู้สึกอึดอัดร่างกายขณะนอนบนเตียง โดยอยู่ในระดับความรู้สึกน้อยที่สุด ($\bar{X} = 0.65$, S.D.=0.88) รองลงมาเป็นข้อที่เกี่ยวกับความรู้สึกถึงการขึ้นลงของเตียง โดยอยู่ในระดับความรู้สึกน้อย ($\bar{X} = 0.85$, S.D.=0.75) ส่วนข้อคำถามที่มีความรู้สึกมากที่สุด คือความรู้สึกถึงแรงสั่นสะเทือนในขณะที่เตียงทำงาน โดยอยู่ในระดับความรู้สึกน้อย ($\bar{X} = 1.50$, S.D.=0.76) และเมื่อพิจารณาเฉพาะเพศหญิง เห็นได้ว่าในภาพรวมอาสาสมัครเพศหญิงมีความรู้สึกต่อการทำงานของเตียงป้องกันแผลกดทับอยู่ในระดับความรู้สึกน้อย ($\bar{X} = 1.26$, S.D.=0.80) เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่าข้อคำถามที่มีความรู้สึกน้อยที่สุด คือ ความรู้สึกอึดอัดร่างกายขณะนอนบนเตียง โดยอยู่ในระดับความรู้สึกน้อย ($\bar{X} = 0.95$, S.D.=0.83) รองลงมาเป็นข้อที่เกี่ยวกับความรู้สึกถึงการขึ้นลงของเตียง โดยอยู่ในระดับความรู้สึกน้อย ($\bar{X} = 1.05$, S.D.=0.60) ส่วนข้อคำถามที่มีความรู้สึกมากที่สุด คือ ความรู้สึกถึงแรงสั่นสะเทือนในขณะที่เตียงกำลังทำงาน โดยอยู่ในระดับความรู้สึกปานกลาง ($\bar{X} = 1.75$, S.D.=0.64) และเมื่อเปรียบเทียบความความรู้สึกของผู้ใช้เตียงป้องกันแผลกดทับจำแนกตามเพศ พบว่า ความรู้สึกในภาพรวมของผู้ใช้เตียงป้องกันแผลกดทับทั้งเพศชายและเพศหญิงมีความรู้สึกต่อการใช้เตียงไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่าทุกข้อคำถามอาสาสมัครทั้งเพศชายและเพศหญิงมีความรู้สึกต่อการใช้เตียงไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

และจาก Table 5 เมื่อพิจารณาที่ค่ารวมเฉลี่ย พบว่า อาสาสมัครที่มีค่า BMI ต่างกันทั้ง 5 กลุ่ม มีระดับความรู้สึกต่อการทำงานของเตียงป้องกันแผลกดทับอยู่ในระดับน้อยทุกกลุ่ม โดยกลุ่มที่มีค่า BMI 23-24.9 และกลุ่มที่มีค่า BMI 25-29.9 มีค่ารวมเฉลี่ยน้อยที่สุด ($\bar{X} = 1.03$, S.D.=0.80) ($\bar{X} = 1.03$, S.D.=0.83) ตามลำดับ รองลงมาเป็นกลุ่มที่มีค่า BMI < 18.5 ($\bar{X} = 1.06$, S.D.=0.60) และกลุ่มที่มีค่า BMI 18.5-22.9 ($\bar{X} = 1.09$, S.D.=0.70) ตามลำดับ ในขณะที่กลุ่มที่มีค่า BMI > 30 มีค่ารวมเฉลี่ยมากที่สุด ($\bar{X} = 1.47$, S.D.=0.75) แต่มีความรู้สึกต่อการทำงานของเตียงป้องกันแผลกดทับอยู่ในระดับน้อยเช่นเดียวกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบความความรู้สึกของผู้ใช้เตียงป้องกันแผลกดทับจำแนกตามค่า BMI ในภาพรวม เห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อคำถาม พบว่า ข้อคำถามที่เกี่ยวกับความรู้สึกถึงการขึ้นลงของเตียงกับข้อคำถามที่เกี่ยวกับความรู้สึกถึงแรงสั่นสะเทือนในขณะที่เตียงกำลังทำงาน ผู้ใช้เตียงป้องกันแผลกดทับจำแนกตามดัชนีมวลร่างกายมีความรู้สึกที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ข้อคำถามที่เกี่ยวกับความรู้สึกอึดอัดของร่างกายขณะนอนบนเตียงป้องกันแผลกดทับกับข้อคำถามที่เกี่ยวกับความรู้สึกร้อนบริเวณผิวหนังที่สัมผัสกับที่นอนของเตียง กลุ่มที่มีค่า BMI ต่างกัน มีความรู้สึกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ซึ่งจากผลที่ต่างกันทางสถิตินี้ จึงทำการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างเป็นรายคู่ด้วยวิธี Scheffe เฉพาะข้อคำถามที่ต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงใน Table 4 และ Table 5 ดังนี้

Table 5 Comparison of User Perceptions of the Anti-Bedsore Bed Categorized by BMI

Item	BMI										F	p
	< 18.5		18.5 – 22.9		23 – 24.9		25 – 29.9		> 30			
	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.		
1. Perception of the bed's upward and downward movement	1.38	0.74	1.25	0.71	0.88	0.64	0.63	0.52	0.63	0.52	2.44	0.07
2. Perception of vibration during the operation of the bed	1.88	0.64	1.75	0.71	1.63	0.74	1.50	0.76	1.38	0.74	0.60	0.66
3. Perception of any physical discomfort while lying on the bed	0.38	0.52	0.50	0.53	0.63	0.74	0.75	0.89	1.75	0.89	4.50	0.005 [*]
4. Perception of heat sensation on the skin surface in contact with the mattress	0.63	0.52	0.88	0.83	1.00	1.07	1.25	1.16	2.13	0.83	3.20	0.02 [*]
Total Average	1.06	0.60	1.09	0.70	1.03	0.80	1.03	0.83	1.47	0.75	0.70	0.59

* Statistical significance was set at the 0.05 level

Table 6 Pairwise Comparison of Perception of Any Physical Discomfort while Lying on the Bed, Categorized by BMI

$\bar{x}$		$\bar{x}_{I-J}$	p
BMI (<i>I</i>)	BMI (<i>J</i>)		
< 18.5	18.5 - 22.9	0.13	1.00
	23.0 - 24.9	0.25	0.96
	25.0 - 29.9	0.38	0.84
	> 30.0	1.38	0.005 [*]
18.5 - 22.9	23.0 - 24.9	0.13	1.00
	25.0 - 29.9	0.25	0.96
	> 30.0	1.25	0.01 [*]
23.0 - 24.9	25.0 - 29.9	0.13	1.00
	> 30.0	1.13	0.03 [*]
25.0 - 29.9	> 30.0	1.00	0.07

* Statistical significance was set at the 0.05 level

Table 7 Pairwise Comparison of Perception of Heat Sensation on the Skin Surface in Contact with the Mattress, Categorized by BMI

$\bar{x}$		$\bar{x}_{I-J}$	p
BMI (<i>I</i>)	BMI (<i>J</i>)		
< 18.5	18.5 - 22.9	0.25	0.98
	23.0 - 24.9	0.38	0.92
	25.0 - 29.9	0.63	0.65
	> 30.0	1.50	0.02 [*]
18.5 - 22.9	23.0 - 24.9	0.13	1.00
	25.0 - 29.9	0.38	0.92
	> 30.0	1.25	0.07
23.0 - 24.9	25.0 - 29.9	0.25	0.98
	> 30.0	1.13	0.12
25.0 - 29.9	> 30.0	0.88	0.33

* Statistical significance was set at the 0.05 level

จาก Table 6 เห็นได้ว่ากลุ่มที่มีค่า BMI < 18.5 มีความรู้สึกต่างกับกลุ่มที่มีค่า BMI > 30 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และกลุ่มที่มีค่า BMI 18.5-22.9 มีความรู้สึกต่างกับกลุ่มที่มีค่า BMI > 30 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 นอกจากนี้กลุ่มที่มีค่า BMI 23.0-24.9 มีความรู้สึกต่างกับกลุ่มที่มีค่า BMI > 30 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เช่นกัน

ส่วน Table 7 เห็นได้ว่ากลุ่มที่มีค่า BMI < 18.5 มีความรู้สึกต่างกับกลุ่มที่มีค่า BMI > 30 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากผลการประเมินความรู้สึกและการรับรู้ของผู้ใช้เพียงในกลุ่มอาสาสมัครสุขภาพดีจำนวน 40 คน ซึ่งทดลองนอนบนเตียงป้องกันแผลกดทับเป็นเวลา 30 นาที เห็นได้ว่าระดับความไม่สบายทางร่างกายและการรับรู้แรงสั่นสะเทือนจากการทำงานของระบบสลับจืดรองรับน้ำหนักอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนที่สลับขึ้น-ลงเป็นไปอย่างนุ่มนวล ไม่ก่อให้เกิดแรงกระตุกหรือแรงสั่นสะเทือนที่รบกวนการพักผ่อนของผู้ใช้ ทำให้ผู้ใช้งานยังคงรู้สึกผ่อนคลายขณะระบบทำการกระจายแรงกดทับ แต่เมื่อพิจารณาจำแนกตามกลุ่มผู้ใช้งาน พบข้อสำคัญคือ กลุ่มอาสาสมัครที่มีค่า BMI > 30 (ภาวะอ้วน) พบว่า มีความรู้สึกร้อนบริเวณผิวหนังสัมผัสกับเบาะและระดับความไม่สบายตัวสูงกว่ากลุ่มที่มี BMI ในเกณฑ์ปกติอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องจากคนที่มีภาวะอ้วนจะมีอุณหภูมิร่างกายลดลงช้ากว่า ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในสภาพอากาศหนาวเย็น แต่ในทางกลับกันมันกลับขัดขวางการระบายความร้อน และทำให้คนอ้วนเสี่ยงต่อภาวะความเครียดจากความร้อนมากกว่าคนรูปร่างผอม [34] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ He et al. [35] ที่ศึกษาเปรียบเทียบความสบายทางความร้อนในสภาวะแวดล้อมที่อุ่น ระหว่างกลุ่มผู้ที่มีค่า BMI สูงและต่ำ พบว่า กลุ่มที่มีค่า BMI สูง จะมีระดับความชื้นผิวหนัง (Skin Wettedness: Wskin) การรับรู้การหลังเหงื่อ (Perceived Sweating Votes: PSV) และความดันโลหิต (Blood Pressure: BP) สูงกว่ากลุ่มที่มีค่า BMI ต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งส่งผลต่อความรู้สึกไม่สบายตัวจากความร้อนโดยตรง

อย่างไรก็ตามการทดสอบและประเมินเตียงป้องกันแผลกดทับกำหนดระยะเวลาทดลองนอนของอาสาสมัครสุขภาพดีไว้ที่ 30 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เพียงพอสำหรับการประเมินความรู้สึกและความพึงพอใจต่อฟังก์ชันการทำงานผ่านแบบสัมภาษณ์เชิงโครงสร้างได้อย่างครอบคลุม อีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงความไม่สบายตัวโดยไม่จำเป็นและปฏิบัติตามข้อจำกัดด้านจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ เนื่องจากไม่สามารถจำลองการนอนเป็นเวลานานเกิน 2 ชั่วโมงตามเกณฑ์การเกิดแผลกดทับทางคลินิกในผู้ใหญ่สุขภาพปกติได้ ข้อจำกัดนี้จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรขยายผลการศึกษากลุ่มผู้ป่วยติดเตียงที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดแผลกดทับในระยะเวลาต่อไปในอนาคต โดยในส่วนของการใช้งานจริงกับผู้ป่วยที่มีค่า BMI > 30 สามารถตั้งค่าอุณหภูมิระบายความร้อนให้เหมาะสมเป็นพิเศษ เพื่อช่วยลดการสะสมความร้อนบริเวณผิวหนังสัมผัสได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

Conclusions

สรุปผลการหาประสิทธิภาพของเตียงป้องกันแผลกดทับ พบว่า เตียงมีความแข็งแรงทนทานสูง โดยการทดสอบรับน้ำหนัก 150 kg นาน 8 ชั่วโมง เกิดการโก่งตัวของคานน้อยกว่าค่ามาตรฐานอย่างมาก ทั้งในรูปแบบสลักชุดรับน้ำหนัก (การโก่งตัว 0.096 mm) และแบบรับน้ำหนักชุดเดียว (การโก่งตัว 0.236 mm) ในส่วนของระบบระบายความร้อนด้วยระบบควบคุมแบบพีไอในค่าที่เหมาะสม ช่วยลดอุณหภูมิได้เตียงได้อย่างรวดเร็วและรักษาอุณหภูมิให้คงที่โดยเกิดการแกว่งเพียงเล็กน้อย ด้านความรู้สึกของผู้ใช้งานจากการทดสอบกับอาสาสมัครพบว่า ทั้งเพศชายและเพศหญิงมีความรู้สึกต่อการทำงานของเตียง (การขึ้นลง แรงสั่น สะเทือน ความอึดอัด และความร้อน) ในระดับน้อย โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อย่างไรก็ตามผู้ที่มีความ BMI ต่างกัน จะมีความรู้สึกในประเด็นความอึดอัดร่างกายและความร้อนที่ผิวหนังสัมผัสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

Acknowledgements

บทความวิจัยเรื่องนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม และคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2567 ตามสัญญารับทุน RDI-1-67-30 (การพัฒนาเตียงป้องกันแผลกดทับ) และขอขอบพระคุณคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม และคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์เครือข่าย มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่พิจารณารับรองจริยธรรมโครงการวิจัยตามแนวทางหลักจริยธรรมการวิจัยในคนที่เป็นมาตรฐานสากล ตามเอกสารรับรอง COA No. 024/2025, NREC No. 0061/2567

References

1. Sirimahachaiyakul, P. and Chiraworaphat, S. 2024. Collective review: Pressure ulcer. *Thai Journal of Burn and Wound Healing*, 5, 55-77. (In Thai)
2. Chularee, S., Chiaranai, C., Phetrot, S. and Chatphimai, D. 2023. Caring for critically ill patients with hospital-acquired pressure injuries: The role of critical care nurses. *Journal of Health and Nursing Education*, 29, 1-15. (In Thai)
3. Utthiya, P. 2023. Roles of home health care nurses in prevention & care for patients with pressure injury at home: The experience of Ramathibodi Hospital. *Journal of Health and Nursing Research*, 39, 12-21. (In Thai)

4. Department of Health. 2024. Percentage of elderly people with dependency receiving care according to the care plan. Ministry of Public Health [Online]. Available: <https://dashboard.anamai.moph.go.th/dashboard/agedcareplan/index?year=2024> [4 April 2026] (In Thai)
5. Chobchuen, R. 2013. Nursing care in pressure sore. *Srinagarind Medical Journal*, 28, 41-46. (In Thai)
6. Ebrahim, J., Deribe, B., Biru, W.J. and Feleke, T. 2018. Prevalence and factors associated with pressure ulcer among patients admitted in Hawassa University Referral Hospital, South Ethiopia. *Journal of Health Care and Prevention*, 1, 1-7.
7. Khajavi, M., Raoufi, Z. and Abdollahi, S. 2025. Investigating the potential of collagen/carrageenan trilayer sponges with optimal therapeutic and physical properties for the treatment of pressure ulcers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 306, 141743. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141743>
8. Sukwasana, K., Prasertsri, S., Nahokham, M., Singweratham, N., Nawsuwan, K. and Khammathit, A. 2023. The effects of applying the 3-plus innovation to eliminate bed sore on reducing the severity of pressure sores and the satisfaction of innovative users in the female medicine unit, Thabo Crown Prince Hospital. *Journal of Nursing and Public Health Research*, 3, 48-61. (In Thai)
9. Komindr, S. 2001. Bed for Prevention and Treatment of Pressure Sores (Thai Patent No. 10591). Department of Intellectual Property. (In Thai)
10. Utyophas, Y. 2007. Anti-Bedsore Patient Bed (Thai Patent No. 21323). Department of Intellectual Property. (In Thai)
11. Kovitnawong, N., Somnukpong, S. and Rujapanmatee, M. 2021. Bed for Preventing Pressure Ulcers (Thai Petty Patent No. 17827). Department of Intellectual Property. (In Thai)
12. Sittisakuncharoen, S. 2017. Patient Turning Bed for Pressure Sore Prevention (Thai Petty Patent No. 13198). Department of Intellectual Property. (In Thai)
13. Methakanjanasak, N., Ruangsuksud, P., Changruang, O., Daochalermwong, S., Kaewnoi, K., Namwas, S., Suphrom, K., Wingwian, I., Boonjirapiphat, A., Thiabbokmai, S. and Sringsarn, P. 2023. Pressure Ulcer Prevention Bed (Thai Petty Patent No. 22231). Department of Intellectual Property. (In Thai)

14. Mamom, J. 2016. Electric Patient-Turning Bed with Handrails (Thai Petty Patent No. 11214). Department of Intellectual Property. (In Thai)
15. Nontakaew, U., Chiaranaisilawong, P., Srikitsuwarn, S., Soontornkiti, S., Chanpongsri, V., and Thanawatkosol, S. 2013. Bed Supplementary Mechanism for Pressure Sore Prevention by Weight-Shifting Method (Thai Petty Patent No. 8069). Department of Intellectual Property. (In Thai)
16. Pheetarakorn, P. 2021. Nursing care of the patients with pressure injury: Nurse's role. *Hua Hin Medical Journal*, 1, 1-16. (In Thai)
17. International Electrotechnical Commission. 2026. Medical Electrical Equipment — Part 2-52: Particular Requirements for the Basic Safety and Essential Performance of Medical Beds for Adults (IEC Standard No. 80601-2-52:2026)
18. Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. 2018. Fundamentals of Physics. John Wiley & Sons, New Jersey.
19. Sirimahachaikul, P. and Chiravoraphan, S. 2021. Literature review: Pressure ulcer. *Thai Journal of Burn and Wound Healing*, 5, 55-77. (In Thai)
20. Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H. and Tinz, B. 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56, 515–535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>
21. International Electrotechnical Commission. 2005. Medical Electrical Equipment — Part 1: General Requirements for Basic Safety and Essential Performance (IEC 60601-1:2005).
22. McCormac, J.C. and Csernak, S.F. 2011. Structural Steel Design. Pearson, New Jersey.
23. Jitkhajornwanich, K. 2006. Shifting Comfort Zone for Hot-Humid Environments. *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, Switzerland.
24. Taweekun, J. and Tantiwichien, A. 2013. Thermal comfort zone for Thai people. *Engineering*, 5, 525–529. <https://doi.org/10.4236/eng.2013.55062>
25. Zheng, G., Li, K. and Wang, Y. 2019. The effects of high temperature weather on human sleep quality and appetite. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 270. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020270>
26. Guarnieri, G., Olivieri, B., Senna, G. and Vianello, A. 2023. Relative humidity and its impact on the immune system and infections. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 9456. <https://doi.org/10.3390/ijms24119456>

27. Ogata, K. 2010. Modern Control Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
28. Unhavanich, S. 2002. Control System, W. Phetsakun, Bangkok. (In Thai)
29. Threerapongphatthana, P. 2023. The factors predicting body mass index over the normal range of staff in Buddhachinaraj Phitsanulok Hospital. *Department of Health Service Support Journal*, 19, 27-36. (In Thai)
30. Silpcharu, T. 2010. Research and Statistical Data Analysis with SPSS. Business Research and Development Partnership, Bangkok. (In Thai)
31. Hibbeler, R.C. 2016. Mechanics of Materials. Pearson, New York.
32. Rodrigo, D.S. and Sewwandi, H.M.N. 2018. Comparison of deflection patterns of simply supported and fixed supported beam structures. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5, 240–243. <https://doi.org/10.22161/ijaers.5.9.26>
33. Valentina, P., Tjahjono, H., Pamitran, A.S., Roswandi, I., Setiawan, P.H., Budiman, A.A., Haryanto, D., Sanda, Prayogo, K. and Juarsa, M. 2025. Implementation of adaptive PID control for maintaining temperature stability during steady state conditions in stirred heating tank. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 16, 2389–2399. <https://doi.org/10.11591/ijped.v16.i4.pp2389-2399>
34. Speakman, J.R. 2018. Obesity and Thermoregulation (pp. 431-443), in A.A. Romanovsky (Ed.) *Handbook of Clinical Neurology, Thermoregulation: From Basic Neuroscience to Clinical Neurology Part I*. Vol. 156, Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63912-7.00026-6>
35. He, M., Guo, J., Liu, H., Xiong, F., Zhou, S., Wu, Y., Li, B. and Kosonen, R. 2025. Does BMI affect thermal comfort in young people in warm indoor environments? Evidence from a climate chamber experiment in non-normal BMIs. *Journal of Building Engineering*, 106, 112618. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112618>