

การสร้างเครื่องต้นแบบกระจายของเหลวอัตโนมัติสำหรับสารละลายเจือจาง
และอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง
Prototyping of Automatic Dispensing Machine for Diluents
and Liquid Media in Test Tubes

เพ็ญพัทธ์ คำแก้ว^{1*}, วิชวุธ บุญญานุกุล²

Penpak Komkaew^{1*}, Wichawut Boonyanukool²

¹สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹Department of Microbiology, Faculty of Science, Khon Kaen University

²แผนกสอบเทียบ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาขอนแก่น

²Central Laboratory (Thailand) Company Limited, Khon kaen Branch

บทคัดย่อ

การเตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวมักพบปัญหาในขั้นตอนการเตรียมและการบรรจุลงในหลอดทดลอง โดยทั่วไปนิยมใช้กระบอกเข็มฉีดยาพลาสติกหรือเครื่องกระจายกึ่งอัตโนมัติ (dispenser) ซึ่งแต่ละครั้งมีการเตรียมในปริมาณมาก อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมมีขนาดเล็ก ใช้เวลานาน ราคาค่อนข้างแพง มีอายุการใช้งาน 1-2 ปี และที่สำคัญปริมาตรที่ตวงได้ไม่สม่ำเสมออาจเกิดจากความเมื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน ส่งผลให้เมื่อนำไปใช้งานทดสอบด้านจุลชีววิทยาเกิดความผิดพลาดและไม่ตรงตามที่ต้องการ คณะผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบกระจายของเหลวอัตโนมัติสำหรับสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร ขนาดหลอดทดลอง 16x160 มิลลิเมตร จำนวน 100 หลอด มีขั้นตอนดำเนินการวิจัยโดยการออกแบบเครื่อง ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ 1) ถังเก็บและปั๊มกระจายสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว 2) กลไกการเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลว และ 3) ชุดควบคุมการทำงานปั๊มและกลไกการเคลื่อนที่ หลักการทำงานใช้กลไกการขับเคลื่อนแบบเดียวกับเครื่องจักรอุตสาหกรรม ที่เรียกว่า เครื่อง CNC เป็นกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x, y และ z ได้ตามต้องการ ซึ่งกลไกดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลวยังตำแหน่งที่กำหนด และมีปั๊มแบบบริดท์อ (peristaltic pump) จ่ายของเหลวลงในหลอดทดลองตามปริมาตรที่กำหนด โดยใช้โปรแกรมคำสั่ง G code ควบคุมเครื่องผ่านทาง software ที่ชื่อว่า MACH 3 ออกแบบการทำงาน 2 โปรแกรม คือ (1) แบบ 9.00 มิลลิลิตร 100 หลอด และ (2) แบบ 10.00 มิลลิลิตร 100 หลอด จากการศึกษาพบว่า การควบคุมปริมาตรการจ่ายของเหลวใช้ค่า pulse with modulation (PMW) ปรับจาก speed controller และค่า time ปรับด้วยโปรแกรม G code พบว่า ปริมาตร 9.00 มิลลิลิตร ใช้ค่า PMW 72% time 1.4 sec และปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ใช้ค่า PMW 83% time 1.4 sec ผลการทดสอบความถูกต้องแม่นยำ ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.89 ± 0.7 และ 9.99 ± 0.7 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผลการทดสอบมีความแม่นยำสูงแสดงได้ด้วยค่าเบี่ยงเบน

* Corresponding author : penpko@kku.ac.th

มาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ที่ $n=10$ มีค่า %RSD เท่ากับ 0.76 และ 0.70 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบด้วย t-Test พบว่าค่าเฉลี่ยที่ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับในการเตรียมสารละลายเชื้อจากอาหารเลี้ยงเชื้อที่ปริมาตร 9.00 ± 0.2 มิลลิลิตร และปริมาตร 10.00 ± 0.1 มิลลิลิตร อยู่ในเกณฑ์การยอมรับ สรุปได้ว่าเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ (automatic dispensing machine, ADM) ใช้เตรียมสารละลายเชื้อจากอาหารเลี้ยงเชื้อที่บรรจุในหลอดทดลองได้เป็นอย่างดี มีความถูกต้องแม่นยำ น่าเชื่อถือ ช่วยอำนวยความสะดวกลดระยะเวลาในการทำงาน ประหยัดงบประมาณ โดยไม่จำเป็นต้องซื้ออุปกรณ์บ่อยครั้งและมีราคาแพงจากต่างประเทศ ลดค่าใช้จ่ายให้กับห้องปฏิบัติการ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: เครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ สารละลายเชื้อจาก อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว เครื่องมินิซีเอ็นซี

Abstract

Loading diluted solutions and liquid media into test tubes is typically done using plastic syringes or semi-automatic dispensers. However, these methods become problematic when preparing large amount of solutions, causing fatigue for the operator as the small size of the dispensing equipment leads to time-consuming preparations and inaccurate dispensing volumes. Additionally, the dispenser is an expensive and short lifespan of only 1-2 years, when we use it in the microbiology laboratory work, it is presented on error and showed less of accuracy and it was not suitable with the routine laboratory work. Therefore, the aims of this study were to design and create a prototype automatic liquid dispensing machine for pipetting the diluent solutions and liquid culture media packaging in test tubes with volumes of 9.00 and 10.00 mL, test tube size 16x160 mm with a total number of 100 tubes. The machine was designed and consisted of 3 parts: 1) a storage tank and a pump to pipette the diluent solutions and liquid culture media, 2) a movement mechanism to distribute the liquid and 3) a control unit for the pump and movement mechanism. The principle of using working volume was used a drive mechanism similar to an industrial CNC machine that moved along the x, y and z axes to distribute liquid into the designated location with precisely special volume by a peristaltic pump, that was used the G code command program to control the machine via MACH 3 software has two operating programs: (1) 9.00 mL 100 tubes and (2) 10.00 mL 100 tubes. The control of the liquid dispensing volume used the pulse with modulation (PWM), which was set by the speed controller and dispensed time with the G code program for a target volume of 9.00 mL, an optimal PWM value of 72%, and a dispense time of 1.4 seconds. Similarly, a target volume of 10.00 ml necessitated a PWM value of 83% while maintaining a

dispense time of 1.4 seconds. The accuracy test results demonstrated that the average dispensed volumes for the target volumes of 9.00 mL and 10.00 mL were 8.89 ± 0.7 mL and 9.99 ± 0.7 mL, respectively. It was shown high accuracy, with relative standard deviations (%RSD) of 0.76 and 0.70 at $n=10$, respectively. A t-Test revealed no significant difference between the mean values of volume 9.00 mL and 10.00 mL (95% confidence level). Compared with the principle of calibration for preparing diluted solutions and culture media at a volume of 9.00 ± 0.2 mL and 10.00 ± 0.1 mL was found within the acceptance criteria. The results of this study indicated that the Automated Dispensing Machine (ADM) was highly capable for preparing diluent solutions and liquid culture media by using test tubes. The data showed the accuracy and reliability of the ADM. It could help the worker in laboratories with the convenience condition and reduce costs. Moreover, it could apply to the other field of works as well.

Keywords: automatic dispensing machine, diluents, liquid culture media, mini CNC machine

1. บทนำ

สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีบทบาทหน้าที่หลักในการผลิตบัณฑิต มหาบัณฑิต และดุษฎีบัณฑิตสาขาจุลชีววิทยา มีห้องปฏิบัติการด้านการเรียนการสอนและห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา โดยมีภารกิจหลักในการให้บริการวิชาการแก่สังคม บริการตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำ อาหาร และอื่น ๆ ซึ่งงานห้องปฏิบัติการทางจุลชีววิทยา มีการเตรียมสารเคมี สายละลายเจือจาง และอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยเฉพาะอาหารเลี้ยงเชื้อมีความจำเป็นมากสำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ อาหารเลี้ยงเชื้อมีหลายประเภทและหลายชนิด อาหารเลี้ยงเชื้อ (culture medium) เป็นอาหารซึ่งมีส่วนประกอบของสารอาหารในรูปของเหลว (liquid) กึ่งแข็งกึ่งเหลว (semi-solid) และของแข็ง (solid) ประกอบด้วยสารธรรมชาติ และหรือสารสังเคราะห์ที่เป็นแหล่งอาหารให้จุลินทรีย์เจริญ แบ่งเซลล์เพิ่มจำนวน หรือเพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์หรือเก็บรักษาจุลินทรีย์ที่มีชีวิต (ศิริมล นันสนุนานท์, 2562) การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ (media preparation) ประกอบด้วย การจัดทำบันทึกการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ, ภาชนะใส่อาหารเลี้ยงเชื้อ, การชั่งน้ำหนักอาหารผงสำเร็จรูป, การผสมอาหารเลี้ยงเชื้อกับน้ำ, การวัดความเป็นกรดต่าง, การฆ่าเชื้อด้วย autoclave, การหลอมอาหารเลี้ยงเชื้อ และการเติม supplement เป็นต้น ภาชนะที่ใส่อาหารเลี้ยงเชื้อ ต้องเป็นแก้วหรือวัตถุที่ทนการกัดกร่อน ทนร้อน ไม่แตกหัก และควรมีปริมาตรมากกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้อย่างน้อย 20% โดยปกติแล้วห้องปฏิบัติการทางจุลชีววิทยา เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อจากอาหารผงสำเร็จรูปนำไปชั่งตามสูตรและผสมกับน้ำในกรณีที่เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งจะใส่ในขวดแก้วหรือขวดรูปชมพู่ เมื่อฆ่าเชื้อเสร็จแล้วจะนำไปเทลงบนจานเพาะเชื้อ ประมาณ 15-17 มิลลิลิตร ในกรณีสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวจะบรรจุลงในหลอดทดลองและนำไปฆ่าเชื้อก่อนนำไปใช้งาน ห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่จะใช้ที่ปริมาตร 9 และ 10 มิลลิลิตร

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว อยู่ที่ขั้นตอนการเตรียมและการบรรจุลงในหลอดทดลอง ซึ่งการเตรียมแต่ละครั้งจะเตรียมในปริมาณที่มาก เฉลี่ยประมาณ 1,000-7,000 หลอดต่อครั้ง โดยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการจะใช้กระบอกเข็มฉีดยาพลาสติก (syringe) ขนาด 10-25 มิลลิลิตร หรือใช้เครื่องดูดจ่ายกึ่งอัตโนมัติ (dispenser) ในการดูดจ่ายสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว หลักการใช้งานจะต่อ dispenser เข้ากับขวดแก้ว ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรที่ต้องการและปั๊มด้วยมือ (ดิ่งขึ้นลง) บรรจุลงในหลอดทดลองทีละหลอด โดยปกติแล้วทางห้องปฏิบัติการจะเตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวอย่างน้อยปริมาณ 5-70 ลิตร ขึ้นไป ด้วยปริมาณที่ใช้เยอะมากทำให้ต้องเตรียมหลายรอบ เพิ่มขั้นตอนการทำงาน เพราะการใช้งาน dispenser ต้องต่อเข้ากับขวดแก้วจำกัดขนาด 1,000 มิลลิลิตร เท่านั้นในแต่ละรอบ และเครื่องมีขนาดเล็ก ราคาค่อนข้างแพงประมาณ 8,000-15,000 บาทต่อเครื่อง ประกอบกับอายุการใช้งานของเครื่องค่อนข้างสั้น 1-2 ปี และยังต้องยกขวดแก้วที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อขนาด 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้มืออีกข้างในการดิ่งปั๊ม (ดิ่งขึ้นลง) ใส่ลงในหลอดทดลองทีละหลอด อาจจะทำให้ได้ปริมาตรไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากความเมื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน ใช้ระยะเวลาและทำให้ได้ปริมาณไม่ตรงตามที่ต้องการ ซึ่งเกณฑ์การยอมรับปริมาตรของสารละลายเจือจางเท่ากับ 9.00 ± 0.2 มิลลิลิตร (APHA et al., 2023) ซึ่งอาจจะส่งผลให้การตรวจวิเคราะห์ทดสอบหรือการทดลองได้ผลผิดพลาด เช่น กรณีที่ทำการเจือจางและนำไปคำนวณหาปริมาณเชื้อ เป็นต้น และกำหนดให้ปริมาตรของอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวเท่ากับ 10.00 ± 0.1 มิลลิลิตร

ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ได้ เช่น Goszal et al. (2021) ได้นำกลไกการเคลื่อนที่ 2 แกน มาต่อเข้ากับปากกาหมึกซึมเพื่อสร้างเป็นเครื่อง plotter printer ซึ่งต้องการความแม่นยำในการเคลื่อนที่ เพื่อให้ได้ภาพที่ถูกต้องตามแบบที่ต้องการ อีกทั้ง Intarapadung (2021) ใช้กลไกการเคลื่อนที่ 3 แกนของเครื่อง mini CNC ต่อเข้ากับชุดหัวกัด เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิก ให้ได้ขนาดตามแบบที่ต้องการ และขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ งานวิจัยของ วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์ และคณะ (2548) ได้สร้างและออกแบบเครื่องกัดชนิด 3 แกน ใช้สำหรับการทดลอง โดยการเคลื่อนที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร โดยมี PWM เป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละแกน รวมถึง ศักดิ์ชัย ศรีมารณ (2554) พัฒนาโปรแกรมสำหรับเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AT89C51 ทำหน้าที่ควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์ 3 ตัว ทำงานใน แนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลำดับ เพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tran et al. (2021) ได้สร้างเครื่องกัด mini CNC เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยและวิทยาลัยเทคนิค เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำงานของเครื่อง วิธีการสั่งงานและควบคุมเครื่อง ซึ่งมีการเคลื่อนที่ 3 แกน (x, y และ z) มีหัวกัดติดตั้งอยู่กับแกนของเครื่อง สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ได้ทั้ง 3 แกน หัวกัดทำหน้าที่กัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุเนื้ออ่อน ไม่แข็งจนเกินไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของโครงสร้างตัวเครื่อง

จากปัญหาที่กล่าวมาและการทบทวนวรรณกรรมจากงานวิจัยข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประดิษฐ์และสร้างเครื่องต้นแบบดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติสำหรับสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง ที่ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร ขนาดหลอดทดลอง 16x160 มิลลิลิตร จำนวน 100 หลอด ใช้กลไกการขับเคลื่อนแบบเดียวกับเครื่องจักรอุตสาหกรรมที่เรียกว่า เครื่อง CNC ย่อมาจาก

คำว่า computer numerical control หมายถึง การควบคุมการทำงานของเครื่องจักรด้วยคำสั่งเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบคอมพิวเตอร์ และระบบอิเล็กทรอนิกส์ จะทำการประมวลผลและสั่งการ ให้เครื่องจักรทำงานหรือเกิดการเคลื่อนที่จากชุดคำสั่งต่าง ๆ (Panmaneeenc, 2558) เป็นกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x, y และ z ได้ตามต้องการ ซึ่งกลไกดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลวยังตำแหน่งที่กำหนดและมีปั๊มแบบรีดท่อ (peristaltic pump) จ่ายของเหลวลงในหลอดทดลองตามปริมาตรที่กำหนด โดยใช้โปรแกรมคำสั่ง G code ควบคุมเครื่องผ่านทาง software ชื่อว่า MACH 3 เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและเป็นการพัฒนางานในหน่วยงานให้มีประสิทธิภาพและได้มาตรฐานยิ่งขึ้น โดยคาดว่าผลงานวิจัยนี้จะสามารถอำนวยความสะดวก ลดระยะเวลาในการทำงาน ประหยัดงบประมาณ โดยไม่จำเป็นต้องซื้ออุปกรณ์บ่อยครั้งและมีราคาแพงจากต่างประเทศ ลดค่าใช้จ่ายให้กับห้องปฏิบัติการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบชุดจ่ายของเหลวอัตโนมัติสำหรับสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง

2.2 เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องชุดจ่ายของเหลวอัตโนมัติสำหรับเตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องชุดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ (automatic dispensing machine, ADM) ใช้สำหรับสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวในหลอดทดลอง มีขั้นตอนดังนี้

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องชุดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ

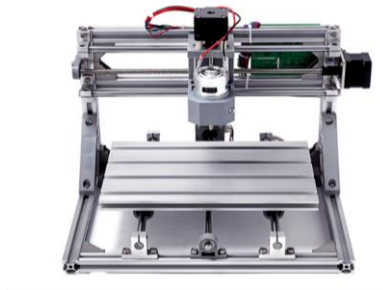
การออกแบบและสร้างเครื่องชุดจ่ายของเหลวอัตโนมัติสำหรับสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง ตัวเครื่องประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ถังเก็บและปั๊มชุดจ่ายสารละลายและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว กลไกการเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลว ชุดควบคุมการทำงานของปั๊มและกลไกการเคลื่อนที่ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 หลักการออกแบบเครื่อง

พื้นฐานการทำงานของตัวเครื่องในส่วนของกลไกการเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลวจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบคาร์ทีเซียน การใช้งานทั่วไปของหุ่นยนต์คาร์ทีเซียนคือเครื่องมือเครื่องจักรที่

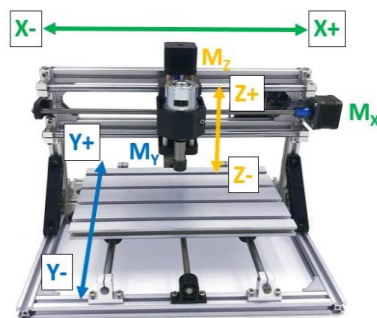
ควบคุมด้วยตัวเลขของคอมพิวเตอร์และอาจมีการใช้งานมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นเครื่องกัดหรือฟลีดเตอร์ (หุ่นยนต์คาร์ทีเซียนคืออะไร, 2021) ซึ่งมีการนำไปใช้งานในการออกแบบและสร้างเครื่องมินิซีเอ็นซีด้วยเช่นกัน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างเครื่องมินิซีเอ็นซี (KTS MALL, ม.ป.ป.)

3.1.1 กลไกการขับเคลื่อน

เครื่องตัดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ มีกลไกการขับเคลื่อนแบบเดียวกับเครื่องจักรอุตสาหกรรม ที่เรียกว่าเครื่อง CNC มีกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x, แกน y และแกน z โดยมี stepper motor จำนวน 3 ตัว ได้แก่ m_x , m_y และ m_z ต่อเข้ากับ lead screw ในการขับเคลื่อนแกนแต่ละแกนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กลไกการขับเคลื่อนการจ่ายของเหลว (Analogread, 2564)

กลไกที่ใช้ในการขับเคลื่อนของเครื่องตัดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ งานวิจัยนี้ได้นำโครงสร้างของเครื่อง mini CNC ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปมาประยุกต์ใช้งาน แต่ต้องปรับแต่งในส่วนของการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y ให้เพิ่มขึ้น ยกกระดากลไกขับเคลื่อนแกน x และแกน z และสร้างชุดจับหัวจ่ายของเหลวขึ้นมาใหม่ โดยชุดจับหัวจ่ายของเหลวจะสามารถจับหัวจ่ายของเหลวครั้งละ 1 หัว และถูกติดตั้งอยู่บนแกนการเคลื่อนที่ตามแกน x, y และ z ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้ง 3 แกน เพื่อให้สามารถจ่ายของเหลวลงหลอดทดลองที่ใส่อยู่ในแร็คได้ ดังภาพที่ 4 จากภาพเป็นการปรับแต่งกลไกขับเคลื่อนของเครื่อง โดยเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y

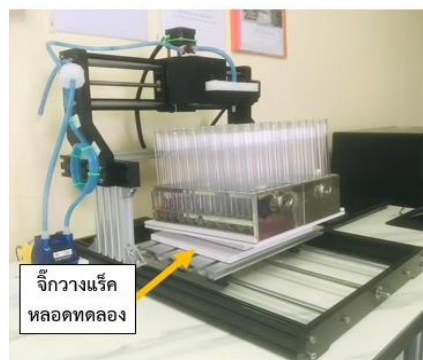
จาก 18 เซนติเมตร เป็น 40 เซนติเมตร ยกระดับกลไกขับเคลื่อนแกน x และแกน z ขึ้นจากระดับเดิมอีก 13 เซนติเมตร เพื่อให้หัวจ่ายของเหลวสามารถเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลวใส่หลอดทดลองขนาด 16x160 มิลลิเมตร จำนวน 100 หลอด ในแร็คที่มีขนาดช่อง 10X10 หลอดได้



ภาพที่ 4 การปรับแต่งกลไกขับเคลื่อนของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ

3.1.2 จี๊ววางแร็คหลอดทดลอง

การทำงานของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ หลอดทดลองที่อยู่ในแร็คจะต้องอยู่ตำแหน่งเดิมตลอด จึงจะสามารถจ่ายของเหลวลงในหลอดได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นจึงออกแบบจี๊วขึ้นมาเพื่อช่วยในการวางแร็คหลอดทดลองให้อยู่ที่ตำแหน่งเดิมตลอด แต่ยังมีปัญหาว่าหลอดทดลองที่ใส่ลงในช่องแร็ค เมื่อวางอยู่บนเครื่องปากของหลอดทดลองยังสามารถขยับตำแหน่งได้ เนื่องจากช่องแร็คมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าหลอดทดลอง จึงออกแบบจี๊ววางแร็ค หลอดทดลองโดยให้มีมุมเอียงจากระนาบเดิมของเครื่องอยู่ที่ประมาณ 5 องศา เพื่อให้หลอดทดลองพิงขอบด้านหนึ่งของช่องแร็ค ตามแรงโน้มถ่วง ปากหลอดทดลองจะอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ดังภาพที่ 5 จากภาพจะเห็นว่าแร็คหลอดทดลองจะถูกวางในจี๊วที่มีมุมเอียงจากระนาบเดิมของเครื่อง โดยระนาบจะเอียงลงไปทางด้านหลังของเครื่อง



ภาพที่ 5 จี๊ววางแร็คหลอดให้มีมุมเอียงประมาณ 5 องศา

3.1.3 การดูจ่ายของเหลว

ของเหลวจ่ายลงหลอดทดลองจะถูกดูดโดยปั๊มที่เรียกว่า ปั๊มรีดท่อ (peristaltic pump) ซึ่งการทำงานของปั๊มจะอาศัยหลักการแทนที่ (positive displacement) โดยจะมีชุด roller หรือ ลูกรีด ต่อเข้ากับมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุน ลูกรีดจะรีดท่อ ซึ่งท่อในที่นี้จะมีลักษณะเป็นท่อสายยางหรือท่อซิลิโคนที่หุ้มด้วยพลาสติก เมื่อมอเตอร์หมุน ลูกรีดจะรีดท่อ ซึ่งท่อในที่นี้จะมีลักษณะเป็นท่อสายยางหรือท่อซิลิโคนที่หุ้มด้วยพลาสติก จะดันของเหลวที่อยู่ในท่อให้เคลื่อนที่ไปในท่อ การทำงานของปั๊มรีดท่อ ของเหลวที่ไหลผ่านจะไม่สัมผัสกับปั๊มโดยตรง แต่จะสัมผัสกับท่อเพียงเท่านั้น ทำให้ปั๊มชนิดนี้จะไม่เกิดการกัดกร่อนจากการใช้งาน และท่อที่ทำจากสายยางหรือซิลิโคนสามารถถอดออกไปล้างทำความสะอาดหรือนำไปฆ่าเชื้อได้ ดังภาพที่ 6 ซึ่งปั๊มรีดท่อที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ยี่ห้อ Kamoer รุ่น KHM-SV3N40 ใช้มอเตอร์กระแสตรง (DC motor) ขนาด 24VDC10W ในการหมุนลูกรีด (roller) อัตราการไหล (flow rate) 550 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 6 ปั๊มรีดท่อ

3.1.4 บอร์ด MACH 3 controller

การควบคุมการทำงานของกลไกการขับเคลื่อนและการดูจ่ายของเหลวจะควบคุมผ่านทางบอร์ด MACH 3 controller หรือเรียกว่า บอร์ดควบคุม (controller board) บอร์ด MACH 3 controller จะสร้างสัญญาณควบคุมตามคำสั่งหรือโค้ดโปรแกรมที่เขียนไว้ โดยสั่งให้กลไกการเคลื่อนที่แต่ละแกนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด ด้วยความเร็วตามที่ต้องการ และสั่งเปิดปิดการทำงานของปั๊มรีดท่อ ดังภาพที่ 7 จากภาพเป็นบอร์ด MACH 3 controller สามารถขับกลไกการเคลื่อนที่ได้ 4 แกน มี I/O port ให้ใช้งานอย่างละ 4 channel จ่ายเอาพุตพัลส์ได้ 100KHZ ในการควบคุม stepper motor ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 24VDC ในการเลี้ยงบอร์ดให้ทำงาน



ภาพที่ 7 บอร์ด MACH 3 controller

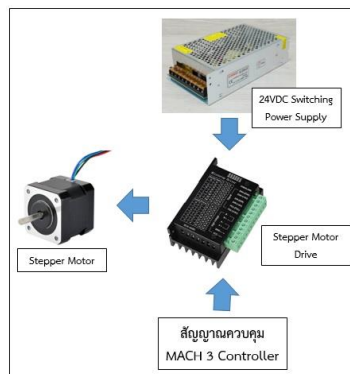
3.1.5 การควบคุมกลไกการเคลื่อนที่แต่ละแกน

การเคลื่อนที่ของเครื่องตัดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ในแต่ละแกนเคลื่อนที่ได้โดย stepper motor ที่ต่อเข้ากับ lead screw ในการขับเคลื่อนแกนแต่ละแกนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ในการสั่ง stepper motor ให้ทำงานจะไม่เหมือนกับ DC motor ทัวไปที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกเข้าสายข้างหนึ่งของ motor และขั้วลบเข้าสายอีกข้างหนึ่งของ motor หากต้องการกลับทิศทางการหมุนของ motor ก็เพียงแค่สลับขั้วเท่านั้น แต่จะต้องมีชุดขับ stepper motor ซึ่งจะสามารถควบคุมความเร็ว ทิศทาง และตำแหน่งในการหมุนไปของ stepper motor ได้ ดังภาพที่ 8 จากภาพ stepper motor drive รุ่น TB6600 ที่เลือกใช้ในงานวิจัย สามารถขับ stepper motor รุ่น NEMA 17 ที่ใช้ในการขับเคลื่อนกลไกแต่ละแกน



ภาพที่ 8 ชุดขับ stepper motor (stepper motor drive)

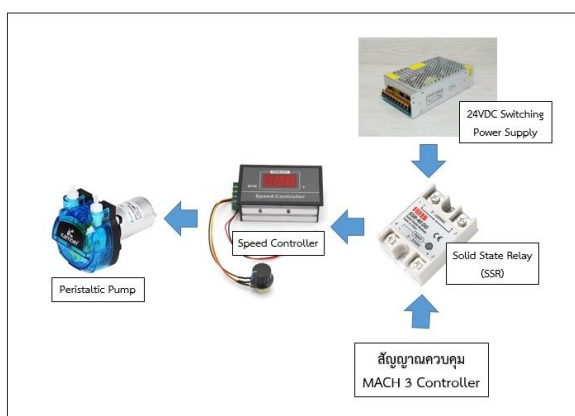
การเคลื่อนที่ของเครื่องตัดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ มีทั้งหมด 3 แกน ได้แก่ แกน x แกน y และแกน z ซึ่งการเคลื่อนที่แต่ละแกนจะมีระบบขับเคลื่อนกลไก ตามภาพที่ 9 จากภาพจะเห็นวาระบบขับเคลื่อนกลไกการเคลื่อนที่แต่ละแกน โดยบอร์ด MACH 3 controller จะส่งสัญญาณควบคุมไปยัง stepper motor drive ตามคำสั่งโปรแกรมคำสั่ง G code ที่เขียนไว้ผ่านทางซอฟต์แวร์ MACH 3 เมื่อ stepper motor drive ได้รับคำสั่งก็จะสั่งให้ stepper motor ทำงาน หมุนด้วยรูปแบบความเร็ว (speed profile) ตามที่ต้องการ และกลไกเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด stepper motor และ stepper motor drive จะใช้ไฟฟ้าในการทำงานที่ 24VDC จาก 24VDC switching power supply



ภาพที่ 9 ระบบขับเคลื่อนกลไกการเคลื่อนที่แต่ละแกน

3.1.6 การควบคุมการทำงานปั๊มจ่ายของเหลว

ปั๊มจ่ายของเหลว มีระบบควบคุมการทำงาน ตามภาพที่ 10 เป็นระบบขับเคลื่อนกลไกการเคลื่อนที่แต่ละแกน โดยบอร์ด MACH 3 controller จะส่งสัญญาณควบคุมไปยัง solid state relay (SSR) ตามคำสั่งโปรแกรมคำสั่ง G code ที่เขียนไว้ผ่านทางซอฟต์แวร์ MACH 3 ซึ่งเป็นสัญญาณที่สั่งเปิดปิดการทำงานของปั๊ม solid state relay (SSR) เมื่อได้รับสัญญาณควบคุมจะส่งจ่ายไฟฟ้า 24VDC จาก 24VDC switching power supply ไปยัง speed controller ซึ่ง speed controller จะมีหน้าที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ปั๊มซึ่งจะส่งผลต่อความเร็วในการจ่ายของเหลว speed controller สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-100% ค่าปรับตั้งยิ่งมากความเร็วมอเตอร์ยิ่งเพิ่มขึ้น ปั๊มทำงานจ่ายของเหลวได้เร็วขึ้น ได้ปริมาตรเพิ่มขึ้นในเวลาเท่ากัน



ภาพที่ 10 ระบบควบคุมการทำงานปั๊มจ่ายของเหลว

3.1.7 การควบคุมปริมาตรการจ่ายของเหลว

การควบคุมการทำงานของปั๊มให้สามารถจ่ายของเหลวได้อย่างถูกต้องและแม่นยำนั้น ต้องปรับความเร็วของมอเตอร์ปั๊มผ่าน speed controller ร่วมกับการปรับเวลาในการเปิดปิดการจ่ายของเหลวของปั๊ม โดยจะใช้วิธีการ trial and error หาค่าการปรับ speed controller (PWM: 0-100%) และเวลาเปิดปิดการจ่ายของเหลว ($T: t > 1 \text{ sec}$) ของปั๊มที่เหมาะสมจากการทดลองได้ค่าที่เหมาะสม

3.1.8 โปรแกรมควบคุมการทำงาน

ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติเป็นภาษาเดียวกันกับที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องจักรอุตสาหกรรม หรือเครื่อง CNC ซึ่งเรียกว่า G code โดยตัวคำสั่งจะสั่งให้หัวดูดจ่ายของเหลวเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง x, y และ z ที่กำหนด สั่งเปิดปิดการทำงานของปั๊มดูดจ่ายของเหลว และหน่วยเวลาการทำงานปั๊มดูดจ่ายของเหลว ดังภาพที่ 11 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม G code ควบคุมเครื่องจักรอุตสาหกรรม ซึ่ง G code สามารถเขียนใน text document ของระบบปฏิบัติการ window ได้ ซึ่งจะมีนามสกุลของไฟล์เป็น .txt โปรแกรม G code ที่เขียนขึ้นมาควบคุมการทำงานของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ จะส่งคำสั่งการทำงานไปยังเครื่อง ADM ผ่านทาง software ที่ชื่อว่า MACH 3 ดังภาพที่ 12 และ 13

โดย MACH 3 เป็น software ที่ใช้ในการส่งโปรแกรมคำสั่ง G code ไปควบคุมการทำงานของเครื่อง ADM ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานได้ทั้งแบบอัตโนมัติ (automatic) และแบบแมนนวล (manual) สำหรับโปรแกรมคำสั่ง G code สั่งงานให้เครื่อง ADM จ่ายของเหลวลงไปในหลอดทดลองขนาด 16x160 มิลลิเมตร ตามปริมาณที่กำหนด มี 2 โปรแกรม สามารถเลือกได้ 2 ปริมาตร คือ 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร จำนวน 100 หลอด

G-code Sample

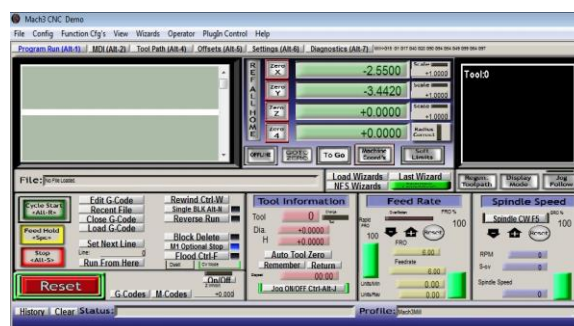
```

M190 S60           ; wait for bed temp
M109 S215          ; wait for extruder temp
G29               ; mesh bed leveling
G1 X10 Y-3.0 Z0.5 F6000.0
G92 E0.0
G1 X60.0 E9.0 F1000.0 ; intro line
G1 X100.0 E12.5 F1000.0 ; intro line
G92 E0.0
    
```

ภาพที่ 11 ตัวอย่าง G code



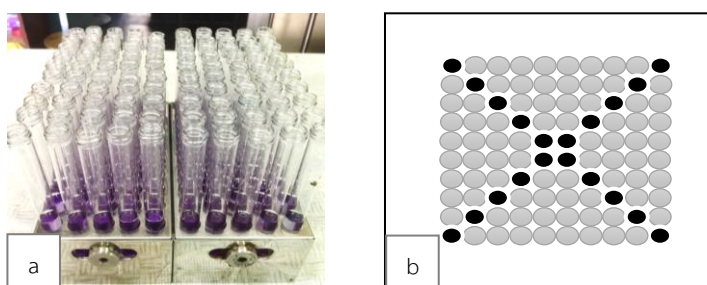
ภาพที่ 12 MACH 3 software



ภาพที่ 13 หน้าจอควบคุมการทำงานของเครื่อง ADM ผ่านทาง MACH 3 software

3.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ

การทดสอบการทำงานของเครื่อง จากการออกแบบโปรแกรมการทำงานไว้มี 2 โปรแกรม คือ (1) แบบ 9.00 มิลลิลิตร 100 หลอด และ (2) แบบ 10.00 มิลลิลิตร จำนวน 100 หลอด แต่ละโปรแกรมทำการสอบการดูดจ่ายจำนวน 10 ซ้ำ (ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร เป็นปริมาตรที่ห้องปฏิบัติการใช้เตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นประจำ) เรียงหลอดทดลองเปล่าลงในแร็คให้ครบ 100 หลอด (1 แถววาง x 100 หลอด) สุ่มหลอดทดลองแบบเจาะจง (purposive sampling) จำนวน 20 หลอด ตามตำแหน่งดังภาพที่ 14 ไปชั่งน้ำหนักสั่งให้เครื่อง ADM ทำงานตามโปรแกรมที่ต้องการ และนำหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อที่เลือกสุ่มไปชั่งน้ำหนัก นำค่าน้ำหนักที่ได้ไปลบกับหลอดทดลองเปล่าจะได้ค่าน้ำหนักจริง บันทึกผลการทดลอง



ภาพที่ 14 หลอดทดลองขนาด 16x160 มิลลิเมตร (a) สารละลายเจือจางหรืออาหารเลี้ยงเชื้อที่บรรจุในหลอดทดลอง ด้วยเครื่อง ADM จำนวน 100 หลอด และ (b) การสุ่มแบบเจาะจง (purposive sampling)

3.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากการศึกษาครั้งนี้ใช้สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) และเปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับสำหรับการเตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อที่ปริมาตร 9.00 ± 0.2 มิลลิลิตร (APHA et al., 2022) และ 10.00 ± 0.1 มิลลิลิตร วิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบความถูกต้องของข้อมูลทางสถิติด้วย t-Test ของปริมาตรที่ได้จากเครื่อง ADM โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองแตกต่างหรือยอมรับอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ด้วยโปรแกรม excel analysis data

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการควบคุมปริมาตรการจ่ายของเหลว

การทำงานของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ออกแบบจำนวน 2 โปรแกรม (1) แบบ 9.00 มิลลิลิตร 100 หลอด และ (2) แบบ 10.00 มิลลิลิตร 100 หลอด ทดสอบการปรับและควบคุมปริมาตรการจ่ายของเหลวใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ (pulse with modulation: PWM) ปรับที่ speed controller และค่า time ปรับในโปรแกรม G code จากผลการทดสอบปริมาตร 9.00 มิลลิลิตร ค่าการปรับ speed controller

(PWM เท่ากับ 72%) เวลาเปิดปิดการจ่ายของเหลว (time: 1.4 sec) ระยะเวลาดูดจ่ายของเหลว 5.17 นาที/โปรแกรม และปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ค่าการปรับ speed controller (PWM เท่ากับ 83%) เวลาเปิดปิดการจ่ายของเหลว (time: 1.4 sec) ระยะเวลาดูดจ่ายของเหลว 5.17 นาที/โปรแกรม

4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำ

การทำงานของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ออกแบบจำนวน 2 โปรแกรม (1) แบบ 9.00 มิลลิลิตร 100 หลอด และ (2) แบบ 10.00 มิลลิลิตร 100 หลอด แต่ละโปรแกรมทำการทดสอบ 10 ซ้ำ โดยที่สั่งให้ทำงานครั้งละ 100 หลอด (1 แท่นวางx100 หลอด) และสุ่มหลอดทดลองแบบเจาะจง (purposive sampling) จำนวน 20 หลอด ตามภาพที่ 14 นำไปชั่งน้ำหนักและหาปริมาตรเฉลี่ย พบว่าปริมาตร 9.00 mL มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.89 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.07 และค่าความแม่นยำเท่ากับ 0.76 และปริมาตร 10.00 mL มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.99 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.07 และค่าความแม่นยำเท่ากับ 0.70 ดังตารางที่ 2 ผลการทดสอบที่ ในการทดสอบความถูกต้องของปริมาตรที่วัดจากเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความถูกต้องที่ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร จากเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ

n จำนวนซ้ำ ของการทดสอบ (n=10)	เครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ	
	ปริมาตร 9.00 มิลลิลิตร	ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร
	(parameter control: PMW 72%, time 0.4 sec)	(parameter control: PMW 84%, time 0.4 sec)
1	8.97	10.07
2	8.93	9.93
3	9.03	10.00
4	9.04	9.89
5	9.06	9.94
6	9.05	9.88
7	8.99	10.01
8	8.97	10.05
9	8.93	10.03
10	8.84	10.05
mean (ค่าเฉลี่ย)	8.89	9.99
S.D. (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	0.07	0.07
%RSD (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์, ความแม่นยำ)	0.76	0.70

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกับปริมาตร 9.00 มิลลิลิตร จากเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ด้วย t-Test โดยใช้ excel โปรแกรมสถิติ data analysis

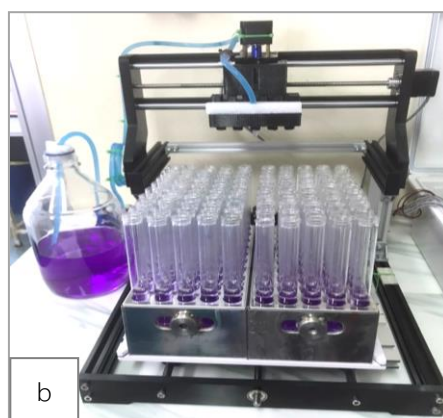
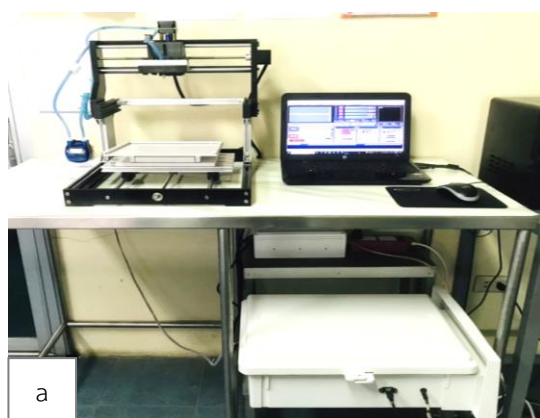
t-Test: one-sample	
ค่าทางสถิติ	เครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ
mean	8.981
variance	0.005
observations	10.000
hypothesized mean difference	9.000
df	9.000
t stat	-0.877
P(T<=t) one-tail	0.202
t critical one-tail	1.833
P(T<=t) two-tail	0.404
t critical two-tail	2.262

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกับปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร จากเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ด้วย t-Test โดยใช้ excel โปรแกรมสถิติ data analysis

t-Test: one-sample	
ค่าทางสถิติ	เครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ
mean	9.985
variance	0.005
observations	10.000
hypothesized mean difference	10.000
df	9.000
t stat	-0.681
P(T<=t) one-tail	0.256
t critical one-tail	1.833
P(T<=t) two-tail	0.513
t critical two-tail	2.262

4.3 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ

จากการออกแบบและสร้างเครื่องโดยอาศัยหลักการออกแบบเครื่อง ที่ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) ถังเก็บและปั๊มดูดจ่ายสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว 2) กลไกการเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลว และ 3) ชุดควบคุมการทำงานปั๊มและกลไกการเคลื่อนที่ หลักการทำงานใช้กลไกการขับเคลื่อนแบบเดียวกับเครื่องจักรอุตสาหกรรม ที่เรียกว่า เครื่อง CNC เป็นกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x, y และ z ได้ตามต้องการ ซึ่งกลไกดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปจ่ายของเหลวยังตำแหน่งที่กำหนด และมีปั๊มแบบรีดท่อจ่ายของเหลวลงในหลอดทดลองตามปริมาตรที่กำหนด โดยสร้างเครื่องต้นแบบออกมาเป็นเครื่องดูดจ่ายของเหลว ดังภาพที่ 15 และแสดงคุณสมบัติของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ตามตารางที่ 4



ภาพที่ 15 เครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ (a) ส่วนประกอบของเครื่อง และ (b) การทำงานของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติที่บรรจุลงในหลอดทดลอง จำนวน 100 หลอด

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ

โปรแกรม	คุณสมบัติของเครื่อง
working area	: 30x40 cm
controller	: 4 แกน I/O Port 4 Channel, 100KHz 24 VDC
stepper motor drive	: รุ่น TB6600
stepper motor	: รุ่น NEMA 17
peristaltic pump	: ยี่ห้อ Kamoer รุ่น KHM-SV3N40 (DC Motor) 24VDC10W, 550 mL/min
software	: MACH 3
โปรแกรม	: G code
ระบบควบคุม	: ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงผลด้วยกราฟิก

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ (ต่อ)

โปรแกรม	คุณสมบัติของเครื่อง
การเชื่อมต่อ :	USB port
ขนาดตัวเครื่อง :	38x60x45 cm
พลังงาน :	220VAC/50Hz
ต้นทุนการผลิต :	30,000 บาท

จากการเปรียบเทียบเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติที่วิจัยกับเครื่องดูดจ่ายของเหลวกึ่งอัตโนมัติที่ผลิตจากต่างประเทศ ในด้านงบประมาณ การทำงานของเครื่อง ค่าบำรุงรักษา และการประหยัดเวลา ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติที่วิจัยกับเครื่องดูดจ่ายของเหลวกึ่งอัตโนมัติ ที่ผลิตจากต่างประเทศ

ข้อเปรียบเทียบ	เครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ	เครื่องดูดจ่ายของเหลวกึ่งอัตโนมัติ
งบประมาณและอายุการใช้งาน	30,000 บาท/10 ปี	10,000 บาท/1-2 ปี
การทำงาน	โปรแกรม (1) แบบ 9.00 มิลลิลิตร 100 หลอด และ (2) แบบ 10.00 มิลลิลิตร 100 หลอด ใช้เวลาทำงาน 5.17 นาที/โปรแกรม ทั้ง 2 โปรแกรม	ใช้เวลาเฉลี่ย 11.18±1.53 นาที/ 100 หลอด (ขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงานแต่ละบุคคล และความล้าจากปริมาณงาน)
ค่าบำรุงรักษา	สามารถซื้อชิ้นส่วนอะไหล่ภายในประเทศได้	ไม่มีอะไหล่เปลี่ยน และไม่สามารถซ่อมได้ ต้องซื้อใหม่
ประหยัดเวลาการจัดซื้อ	ออกแบบและสร้างภายใน 2 เดือน ทำให้มีเครื่องใช้งานเพิ่มมากขึ้น	ต้องของบประมาณประจำปี (ใช้เวลาประมาณ 1 ปี)

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้งาน เมื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำที่ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร พบว่า 9.00 มิลลิลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.89 ± 0.07 มิลลิลิตร และ 10.00 มิลลิลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.99 ± 0.07 มิลลิลิตร การทดสอบความแม่นยำแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ พบว่าผลที่ได้จากเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ที่วิจัยขึ้นมีความแม่นยำสูงที่การใช้งานปริมาตร 9.00 มิลลิลิตร ($RSD=0.76\%$, $n=10$) และ 10.00 มิลลิลิตร ($RSD=0.70\%$, $n=10$) หากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์มีค่าน้อยแสดงถึงความแม่นยำของผลการทดสอบ นำค่าเฉลี่ยไป

เปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน APHA et al. (2023) ที่ปริมาตร 9.00 ± 0.2 มิลลิลิตร และ 10.00 ± 0.1 มิลลิลิตร พบว่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับ และนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความสามารถของเครื่องตามมาตรฐาน ISO 7128:2017 (Amd.1/2013) ยอมรับให้เครื่องดูดจ่ายของเหลวผิดพลาดได้ 2% ของปริมาตรที่จ่าย ปริมาตร 9.00 มิลลิลิตร ผิดพลาดได้ 0.18 มิลลิลิตร อยู่ในช่วง 8.82-9.18 มิลลิลิตร และ 10.00 มิลลิลิตร ผิดพลาดได้ 0.20 มิลลิลิตร อยู่ในช่วง 9.80-10.20 มิลลิลิตร นำค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไปพิจารณา และเทียบกับเกณฑ์พบว่า เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานทั้งสองปริมาตร แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำหลักการเครื่อง mini CNC มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ ผลการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำสามารถนำไปใช้งานได้จริง สอดคล้องกับการวิจัยของ Ertekin และ Chiou (2013) เครื่องมินิซีเอ็นซีขนาดเล็กมีกลไกการควบคุมที่แม่นยำ คุ่มค่า และมีประสิทธิภาพ สามารถประยุกต์ใช้กับงานในสาขาต่าง ๆ เช่น การจัดการตัวอย่างทางชีวภาพ การวิเคราะห์ตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม และการทดลองทางอนุชีววิทยา

นำค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบของเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ เปรียบเทียบกับปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการทดสอบ t-Test ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยใช้ excel โปรแกรมสถิติ data analysis ผลการทดสอบที่ปริมาตร 9.00 มิลลิลิตร พบว่าค่า t-stat (คำนวณ) = -0.877 มีค่าน้อยกว่า t-critical (ตาราง) = 2.262 และผลการทดสอบที่ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร พบว่าค่า t-stat (คำนวณ) = -0.681 มีค่าน้อยกว่า t-critical (ตาราง) = 2.262 สรุปว่าผลการทดสอบ ค่าเฉลี่ยของการดูดจ่ายของเหลวที่ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร ไม่แตกต่างจากค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สรุปได้ว่าเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติใช้เตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อที่บรรจุในหลอดทดลองได้เป็นอย่างดีที่ปริมาตร 9.00 และ 10.00 มิลลิลิตร มีความถูกต้องแม่นยำ น่าเชื่อถือ ช่วยอำนวยความสะดวกลดระยะเวลาในการทำงาน ประหยัดงบประมาณ โดยไม่จำเป็นต้องซื้ออุปกรณ์บ่อยครั้งและมีราคาแพงจากต่างประเทศ ลดค่าใช้จ่ายให้กับห้องปฏิบัติการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ เพื่อใช้สำหรับการเตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลวในหลอดทดลอง ได้ออกแบบโปรแกรมไว้สำหรับขนาดหลอดทดลอง 16x160 มิลลิลิตร ควรเขียนโปรแกรม G code ให้รองรับหลอดทดลองขนาดอื่น ๆ ได้ด้วย เพื่อให้ใช้งานได้หลากหลายเพิ่มมากขึ้น และควรพัฒนาเพิ่มหัวจ่ายของเหลวให้มากขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการเตรียมสารละลายเจือจางและอาหารเลี้ยงเชื้อในกรณีที่ต้องเตรียมเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างเครื่องดูดจ่ายของเหลวอัตโนมัติ จากการออกแบบตัวเครื่องได้ออกแบบให้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้สำหรับเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็งที่ต้องการความปลอดเชื้อลงในจานเพาะเชื้อได้เช่นกัน โดยพัฒนาชุดปั๊มจ่ายของเหลวและสายซิลิโคนที่ทนความร้อนสามารถนำเข้าเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อได้ และส่งการทำงานชุดขับเคลื่อนหัวจ่ายของเหลวในการเรียงจานเพาะเชื้อ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนส่งเสริมการวิจัยกองทุนวิจัย นวัตกรรม และบริการวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ขอขอบคุณ รศ.ดร.นันทวัน ฤทธิ์เดช เป็นที่ปรึกษาให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและกำลังใจ พร้อมทั้งหัวหน้าสาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น รศ.ดร.ธีรศักดิ์ สมบัติ ที่สนับสนุนและอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย ขอขอบคุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม

7. เอกสารอ้างอิง

- วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์, อดุลย์ พัฒนภักดี และ สถาพร คล้ายคลึง. (2548). *การออกแบบและควบคุมเครื่องกัด ชนิด 3 แกน* (Design and control a tree axis milling machine). Sripatum University, Bangkokane Campus. <http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/1359>
- ศักดิ์ชัย ศรีमारณ. (2554). การพัฒนาโปรแกรมสำหรับเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็กด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 4(1), 48-55. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/Itech/article/view/29533>
- ศิวิมล นันสุนานนท์. (2562). *การใช้และการควบคุมคุณภาพอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ตามมาตรฐาน ISO 11133:2014*. ศูนย์ฝึกอบรมและบริการที่ปรึกษา บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด.
- หุ่นยนต์คาร์ทีเซียนคืออะไร. (ม.ป.ป.). <https://www.netinbag.com/th/technology/what-is-a-cartesian-robot.html>
- Analogread. (2564). *Mini CNC And Laser Cut*. <https://www.analogread.com/product/2182/mini-cnc-and-laser-cut>
- APHA, AWWA and WEF. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24th ed. Washington, D.C.
- Ertekin, Y., & Chiou, R. (2013, June), Interdisciplinary Senior Design Project to Develop a Teaching Tool: Mini CNC Mill. *Paper presented at 2013 ASEE Annual Conference & Exposition, Atlanta, Georgia*. (pp. 23.802.1-23.802-16). <http://doi.org/10.18260/1-2--19816>
- Goszal, V. F., Nuha, H. H., & Abdurrohman, M. (2021). Manufacturing a Plotter Printer with Computer Numerical Control Based Pen Ink Using CoreXY Mechanisms. *MEDIA INFORMATIKA BUDIDARMA*, 5(2), 370-377. <https://doi.org/10.30865/mib.v5i2.2783>.
- Intarapadung, A. (2021). Development of Mini CNC Machine Design and Building for Making Ceramic Cup and Bowl Prototype. *Pertanika Journal of SCIENCE & TECHNOLOGY*, 29(3), 1991-2002. <https://doi.org/10.47836/pjst.29.3.22>

- International Organization for Standardization. (2007). *ISO 7218:2007/Amd.1:2013. Microbiology of food and animal feeding stuffs. General requirements and guidance for microbiological examinations*. Geneva, Switzerland.
- KTS MALL. (ม.ป.ป.). เครื่องมินิ CNC ขนาดเล็ก, คลองถมช้อปปิ้งมอลล์. <https://www.klongthom-shoppingmall.com/mini-cnc-machine/>
- Panmaneecnc. (2558, 18 ธันวาคม). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ Mini CNC สำหรับนักพัฒนา. <https://panmaneecnc.blogspot.com/2015/12/mini-cnc.html>
- Tung, T.T., Quynh, N.X. & Minh, T.V. (2021). Development and deployment and implementation of a mini CNC milling machine. *Acta Marisiensis Seria Technologica*, 18(2), 24-28. <https://doi.org/10.2478/amset-2021-0014>.