

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO HỆ THỐNG TÁI CHẾ RÁC THẢI NHỰA THÀNH SỢI IN 3D

Vương Gia Hải, Vũ Công Thu,
Hoàng Văn Trung, Nguyễn Thị Quỳnh Anh
Khoa Điện Cơ
Email: haivg@dhhp.edu.vn

Ngày nhận bài: 13/6/2024

Ngày PB đánh giá: 26/6/2024

Ngày duyệt đăng: 24/9/2024

Tóm tắt: Hiện nay tình trạng ô nhiễm rác thải nhựa đã, đang trở thành một trong những thách thức lớn mà các quốc gia trên thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng đang phải đối mặt. Trong bài báo này trình bày một giải pháp tái chế các loại chai nhựa phế thải thành sợi chỉ in 3D dùng làm nguyên liệu đầu vào cho quá trình in các vật phẩm lưu niệm, đồ chơi, vật trang trí,... Chai nhựa phế thải sau khi làm sạch gá lên hệ thống kéo sợi, qua cụm dao cắt được cắt thành dải nhựa, dải nhựa vừa cắt sẽ đưa qua mà kéo sợi tạo thành sợi chỉ theo tiêu chuẩn. Nhiệt độ của quá trình tạo sợi in 3D luôn được giữ ổn định nhờ bộ điều khiển nhiệt độ. Qua quá trình tính toán và thực nghiệm cho thấy độ bền của sợi in 3D do nhóm nghiên cứu tạo ra cao hơn một số vật liệu in có trên thị trường mà giá thành lại rẻ hơn, có nhiều ưu điểm hơn.

Từ khóa: Chai nhựa, in 3D, thiết kế, tái chế, nhiệt độ.

RESEARCH ON DESIGN AND MANUFACTURE A SYSTEM FOR RECYCLING PLASTIC WASTE INTO 3D PRINTING FILAMENTS

Abstract: Nowadays, plastic waste pollution has become one of the major challenges that countries in the world in general and Vietnam in particular are facing. In this paper, we present a solution to recycle waste plastic bottles into 3D printing filaments used as input materials for the printing process of souvenirs, toys, decorative objects.... After being cleaned, waste plastic bottles are placed on the spinning system, through the cutter cluster, cut into plastic strips. The newly cut plastic strips will be passed through and spun to form standard filaments. The temperature of the 3D printing filaments creation process is always kept stable thanks to the temperature controller. Through experiments, it has been shown that the durability of the 3D printing filaments created by the research team is higher than some printing materials on the market but the price is cheaper and has many advantages.

Keywords: Plastic bottles, 3D printing, design, recycling, temperature.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, do sự phát triển của các ngành khoa học công nghệ càng ngày mạnh mẽ đi đôi với sự phát triển đó thì môi trường ngày càng ô nhiễm nghiêm trọng, đặc biệt là

ngày càng nhiều rác thải nhựa được đưa ra ngoài môi trường mỗi ngày. Rác thải nhựa đang trở thành một trong những thách thức lớn mà các quốc gia đang phải đối mặt. Mỗi năm, lượng chất thải nhựa do con người thải ra trên

phạm vi toàn cầu đủ để phủ kín 4 lần diện tích bề mặt trái đất, trong đó có 13 triệu tấn chất thải nhựa được đổ ra đại dương [1]. Ở Việt Nam, thực trạng rác thải nhựa cũng đang gây nhiều lo ngại. Theo số liệu thống kê từ Bộ Tài nguyên và Môi trường, mỗi năm tại Việt Nam có khoảng 1,8 triệu tấn rác thải nhựa thải ra môi trường, 0,28 triệu đến 0,73 triệu tấn trong số đó bị thải ra biển [1]. Tuy nhiên, chỉ 27% trong số đó được tái chế, tận dụng bởi các cơ sở, doanh nghiệp. Điều đáng nói là việc xử lý và tái chế rác thải nhựa còn nhiều hạn chế khi có đến 90% rác thải nhựa được xử lý theo cách chôn, lấp, đốt và chỉ có 10% còn lại là được tái chế. Việt Nam đang đối mặt với nhiều nguy cơ từ rác thải nhựa. Lượng rác thải nhựa gia tăng nhanh chóng, năm 2014 khoảng 1,8 triệu tấn/năm, năm 2016 khoảng 2,0 triệu tấn/năm và hiện nay khoảng 3,27 triệu tấn/năm được tạo ra tại Việt Nam. Khối lượng rác thải nhựa đổ ra biển mỗi năm khoảng 0,28 - 0,73 triệu tấn/năm (chiếm gần 6% tổng lượng rác thải nhựa xả ra biển của thế giới). Tại Việt Nam, bình quân mỗi hộ gia đình sử dụng khoảng 1kg túi nilon/tháng, riêng hai thành phố lớn là Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh, trung bình mỗi ngày thải ra môi trường khoảng 80 tấn rác thải nhựa và túi nilon. Phân loại, thu hồi, tái chế và xử lý rác thải nhựa còn hạn chế. Lượng chất thải nhựa và túi nilon ở Việt Nam chiếm khoảng 8-12% chất thải rắn sinh hoạt. Nhưng chỉ có khoảng 11-12% số lượng chất thải nhựa, túi nilon được xử lý, tái chế, số còn lại chủ yếu là chôn lấp, đốt và thải ra ngoài môi trường. Đây có thể dẫn đến thảm họa môi trường, đặc biệt ô nhiễm đại dương [1].

Hiện nay tại Hải Phòng phải xử lý khoảng 2000 tấn rác thải mỗi ngày bao gồm nhựa và nilong. Trong đó, rác thải đô thị là khoảng 1.100 tấn, rác thải ở khu vực nông thôn là khoảng 600 tấn còn lại là chất thải rắn công nghiệp, nông nghiệp, xây dựng, chất thải y tế nguy hại đạt đến mức báo động, làm hại đến môi trường và cuộc sống xung quanh

mọi người.

Việc xử lý rác thải tại Việt Nam nói chung và Hải Phòng nói riêng đã được thực hiện bằng nhiều cách như: chôn lấp, đốt, tái chế,... nhưng vẫn chưa hoàn toàn xử lý được vấn đề ô nhiễm do rác thải tạo ra, đặc biệt là rác thải nhựa. Để góp một phần vào việc xử lý rác thải nhựa, nhóm nghiên cứu đã đưa ra giải pháp tái chế các chai nhựa thành sợi in 3D dùng trong công nghệ in 3D đang khá phát triển hiện nay.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

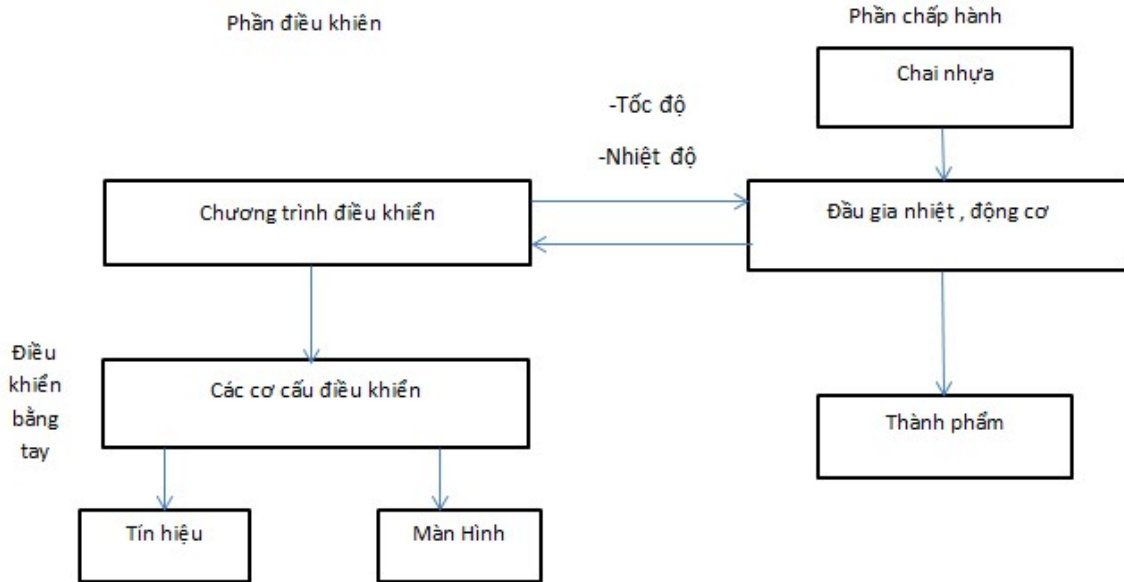
Công nghệ in 3D (AM) đã ra đời và phát triển trở thành một giải pháp đầy hứa hẹn, ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, từ sản xuất công nghiệp cho đến y tế, giáo dục và nghệ thuật [2,3]. Các quy trình này giúp chế tạo nhanh chóng các chi tiết máy, các cụm chi tiết có các chức năng khác nhau với thời gian thực hiện ngắn hơn và giảm chi phí nghiên cứu và phát triển [4,5]. Nikam và cộng sự [5] đã khám phá khả năng sản xuất sợi 3DP bền vững bằng cách tái chế chai Polyethylene terephthalate (PET), sử dụng vòi phun và khối gia nhiệt có đường kính 1,6 mm để kiểm soát nhiệt độ chính xác, đạt được đường kính sợi 1,65 mm đồng nhất và sử dụng công cụ phân tích phần tử hữu hạn (FEA) là SolidWorks để so sánh các tính chất cơ học với vật liệu axit polylactic (PLA) thông thường. Các phát hiện này cung cấp cái nhìn mới hơn về việc tái chế chai PET như là một giải pháp thay thế 3DP thân thiện với môi trường, giảm rác thải nhựa và thúc đẩy tính bền vững trong AM.

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã nghiên cứu thiết kế hệ thống tái chế chai nhựa đã qua sử dụng như: các chai nước lọc, nước ngọt, các can đựng dầu ăn, xăng,... thành sợi in 3D, một nguyên liệu sử dụng cho công nghệ in 3D đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực của cuộc sống hiện nay.

3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG TÁI CHẾ RÁC THẢI NHỰA

3.1. Cấu trúc của hệ thống tái chế rác thải nhựa

* Cấu tạo hệ thống tái chế: Gồm 2 phần chính: Cơ cấu chấp hành và hệ thống điều khiển *Hình 1*



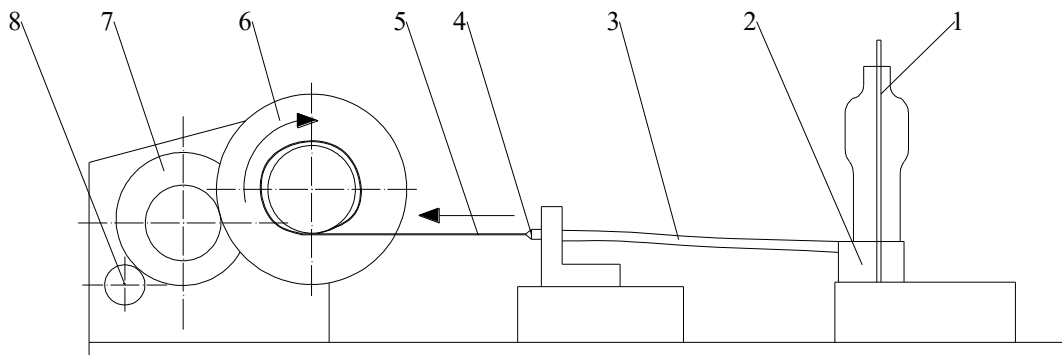
Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống tái chế rác thải nhựa

3.2. Sơ đồ động và nguyên lý hoạt động của máy

Trước tiên chai nhựa được lắp trên thanh đỡ số 1; khi đi qua cụm dao cắt số 2 sẽ cắt chai nhựa thải các dải nhựa số 3 sau đó được đưa qua cụm gia nhiệt số 4, tại cụm gia nhiệt do có nhiệt độ cao (khoảng 200 độ C) nên dải nhựa sẽ bị làm nóng và chuyển từ trạng thái cứng sang trạng thái dẻo, nhờ lực kéo qua lỗ mà ở đầu cụm gia nhiệt nên sẽ tạo hình thành sợi chỉ nhựa dạng tròn số 4, ngay khi ra khỏi đầu lỗ mà, muốn sợi chỉ nhựa nhanh đông cứng lại thì cần hạ nhanh nhiệt độ xuống, ở đây hệ thống có sử dụng thêm một quạt hút nhỏ để thực hiện việc này. Sau khi sợi chỉ nhựa được tạo thành sẽ được cuộn

vào tang cuộn dây số 6. Toàn bộ chuyển động của hệ thống được thực hiện nhờ động cơ điện 12V số 8.

Trong quá trình hoạt động của hệ thống, sự ổn định của nhiệt độ tại cụm gia nhiệt sẽ quyết định đến năng suất và chất lượng của vật liệu in 3D, tại cụm gia nhiệt có lắp một cảm biến đo nhiệt độ và thông qua mạch điều khiển Arduino ta hoàn toàn có thể kiểm soát được nhiệt độ tại đây. Tùy theo mỗi loại vật liệu nhựa khác nhau và kích thước sợi chỉ in 3D khác nhau mà hệ thống làm việc với vận tốc khác nhau, sự thay đổi tốc độ này có thể thực hiện bằng việc thay đổi tốc độ của động cơ thông qua nút điều chỉnh ở bảng điều khiển.

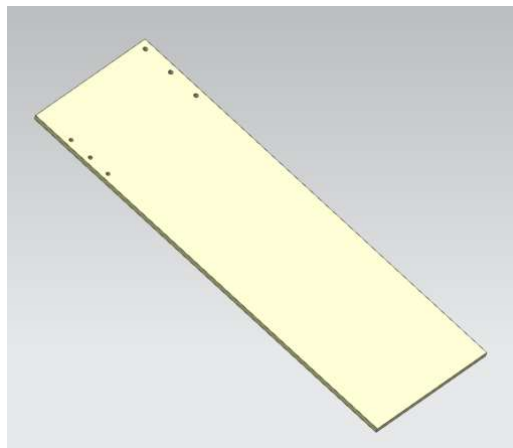


Hình 2. Sơ đồ động hệ thống tái chế rác thải nhựa thành chi in 3D

3.3. Thiết kế khung máy

Yêu cầu của máy là phải có kết cấu vững chắc, bền, đẹp. Để đáp ứng được nhu cầu vững chắc và cân đối giá thành vật liệu khi thiết kế, nên chọn nguyên vật liệu chế tạo khung máy là nhôm. Khung máy được thiết kế là các thanh nhôm định hình có kích thước 20x20mm và 20x40mm. Bàn máy phải đủ độ

cứng vững và chịu được trọng lượng của các thiết bị khi đặt trên nó. Để đáp ứng yêu cầu trên và giá cả hợp lý trong nghiên cứu đã chọn vật liệu cho bàn máy là gỗ ép. Đảm bảo được độ bền và độ cứng vững trong quá trình làm việc của các thiết bị. Bàn máy có kích thước chiều dài x rộng x dày: 666 x 226 x 8(mm). Hình 3



Hình 3. Kết cấu khung và bàn máy

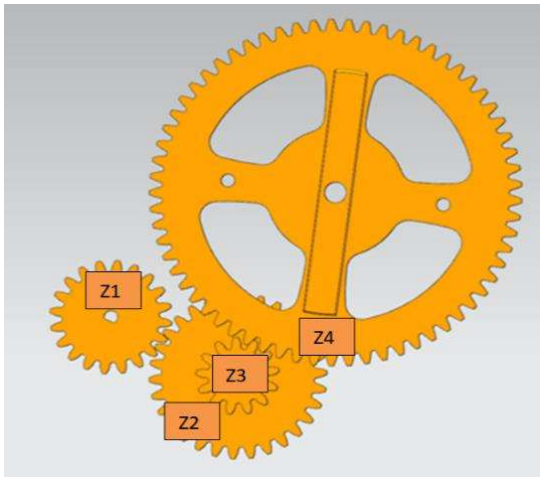
3.4. Lựa chọn bộ truyền bánh răng và động cơ cho hệ thống tang cuốn

Căn cứ vào lực kéo thực nghiệm (160N), nhóm đã lựa chọn bộ truyền bánh răng gồm các bánh răng có thông số như sau:

$Z_1 = 20$ răng, $Z_2 = 30$ răng, $Z_3 = 13$ răng, $Z_4 = 65$ răng

Tỷ số truyền = $Z_4/Z_3 * Z_2/Z_1 = 5 * 1.5 = 7.5$

→ Vậy khi động cơ quay được 7.5 vòng thì bánh răng Z_4 quay được 1 vòng



Hình 4. Bộ truyền bánh răng

* Khoảng cách trục

+ Khoảng cách O1O2 = $r_1+r_2 = 1/2*m(Z_1+Z_2) = 1/2*2(20+30) = 50(\text{mm})$

+ Khoảng cách O2O3 = $r_2+r_3 = 1/2*m(Z_2+Z_4) = 1/2*2(30+65) = 95(\text{mm})$

+ Công suất động cơ qua giảm tốc: $P = 84(\text{w})$

+ Momen xoắn trục động cơ

$T = P*9.55/n = 84*9.55/45\text{prm} = 17.8(\text{Nm})$

+ Lực kéo khi thành sợi

Lực kéo sợi = $175(\text{N}) \rightarrow 17.5(\text{kg})$

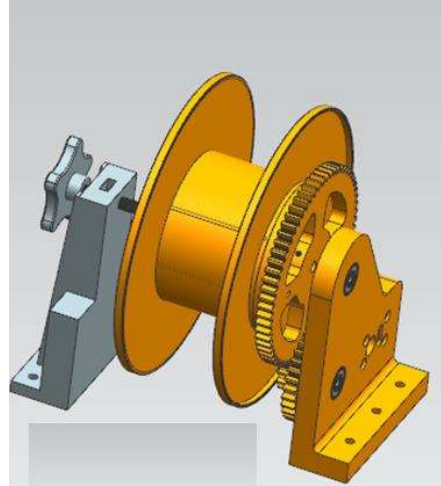
\rightarrow Chọn động cơ chịu tải $>17.5(\text{Kg})$.

Trong nghiên cứu chọn động cơ DC giảm tốc JGY370 High Torque Self-Lock DC Geared Motor. Thông số kỹ thuật của động cơ được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của động cơ JGY370

Thông số	Giá trị
Điện áp (V)	12-24
Tỷ lệ giảm tốc	1/40
Công suất (W)	80-100
Trọng lượng (g)	475
Tốc độ (Vòng/phút)	90
Kích thước động cơ (mm)	57x38
Đường kính trục động cơ (mm)	8

Cụm tang cuốn để kéo và cuộn sợi in 3D sau khi tạo hình được thiết kế gồm: gối đỡ, vòng bi 608zz, thanh ti ren và ecu ($\varnothing 8\text{mm} \times 1.25$), tang cuốn sợi in 3D. Thiết kế cụm tang cuốn chỉ được trình bày trong Hình 5.

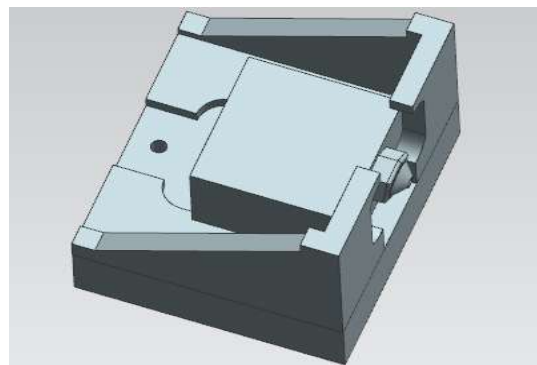


Hình 5. Cụm cuốn chỉ in 3D sau khi được tạo hình

3.5. Thiết kế cụm gia nhiệt

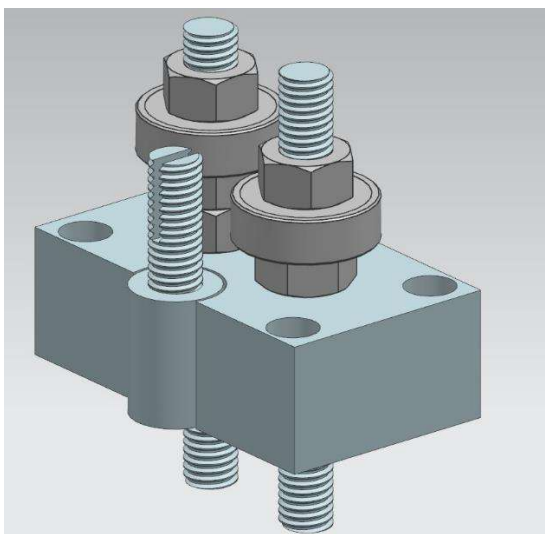
Cụm gia nhiệt có vai trò rất quan trọng trong quá trình tạo hình sợi in 3D từ chai nhựa tái chế. Yêu cầu của cụm gia nhiệt cần có dải nhiệt độ lớn, sự ổn định cao và cần duy trì được những mức nhiệt ổn định khi gia công cho từng loại nhựa khác nhau.

Kết cấu cụm gia nhiệt gồm: Khối nhôm gia nhiệt, khuôn tạo hình kích thước sợi in 3D, đồ gá khối nhôm nhiệt Hình 6.



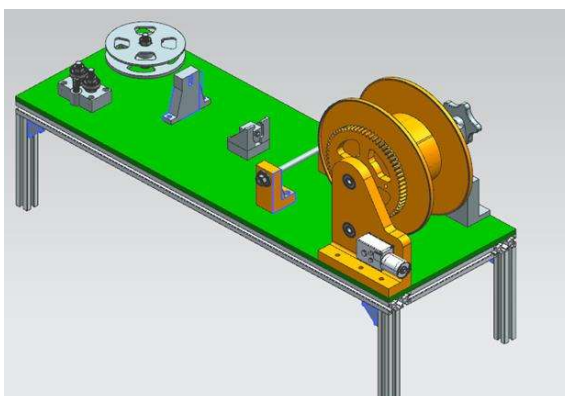
Hình 6. Hình ảnh thiết kế cụm gia nhiệt

Cụm cắt thực hiện nhiệm vụ cắt các chai nhựa thành các dải nhựa để tạo nguồn nguyên liệu đầu vào cấp cho cụm gia nhiệt thực hiện việc tạo hình. Tùy theo đường kính sợi chỉ in 3D khác nhau mà độ rộng hẹp của các dải nhựa được cụm cắt tạo ra là khác nhau. Kết cấu cụm cắt gồm dao cắt, cỡ giới hạn kích thước, cụm giá đỡ để giữ chai nhựa Hình 7.



Hình 7. Hình ảnh cụm cắt được thiết kế

Sau khi thiết kế từng bộ phận của hệ thống tái chế chai nhựa thành sợi in 3D nhóm nghiên cứu tiến hành tổ hợp lắp ghép tạo thành hệ thống hoàn thiện như trong Hình 8.

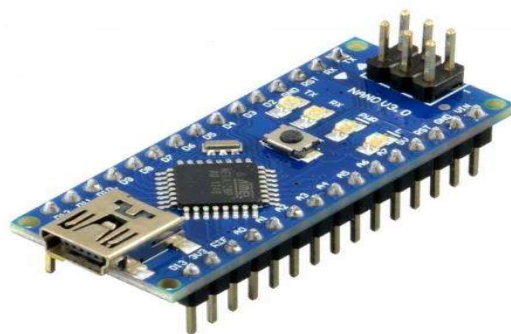


Hình 8 Thiết kế tổng thể hệ thống tái chế chai nhựa thành chỉ in 3D

4. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG TÁI CHẾ CHAI NHỰA THÀNH SỢI CHỈ IN 3D

4.1. Lựa chọn bo mạch điều khiển

Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu đã sử dụng bo mạch Arduino nano (Hình 9) làm vi điều khiển cho hệ thống.



Hình 9. Arduino nano

4.2. Mạch nguồn hạ áp

Trong nghiên cứu sử dụng mạch nguồn hạ áp LM2596 Hình 10, mạch hạ áp này nhỏ gọn có khả năng giảm áp từ 30V xuống 1.5V mà vẫn đạt hiệu suất cao (92%). Thích hợp cho các ứng dụng chia nguồn, hạ áp, cấp cho các thiết bị như camera, motor, robot,...

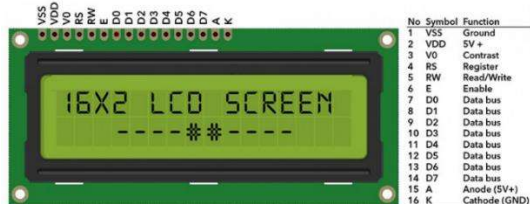


Hình 10. Mạch hạ áp LM2596

4.3. Màn hình text LCD và modul I2C

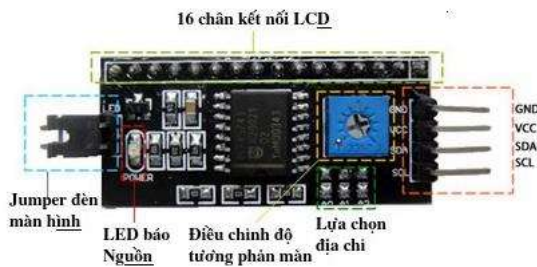
Nghiên cứu sử dụng màn hình text LCD1602 sử dụng driver HD44780, có khả năng hiển thị 2 dòng với mỗi dòng 16

ký tự, màn hình có độ bền cao, rất phổ biến, nhiều code mẫu và dễ sử dụng. Màn hình giúp hiển thị nhiệt độ hiện tại của cụm gia nhiệt và nhiệt độ cài đặt. Điều này giúp quá trình hoạt động của hệ thống được kiểm soát tốt hơn.



Hình 11. Màn hình LCD 1602

Modun I2C Hình 11 có nhiệm vụ chuyển đổi giao tiếp cho màn hình LCD giúp hiển thị thông tin lên màn hình LCD một cách dễ dàng. Ngoài ra có thể điều chỉnh được độ tương phản nhờ biến trở trên modun.



Hình 12 Mạch I2C

4.4. Dây đo nhiệt độ

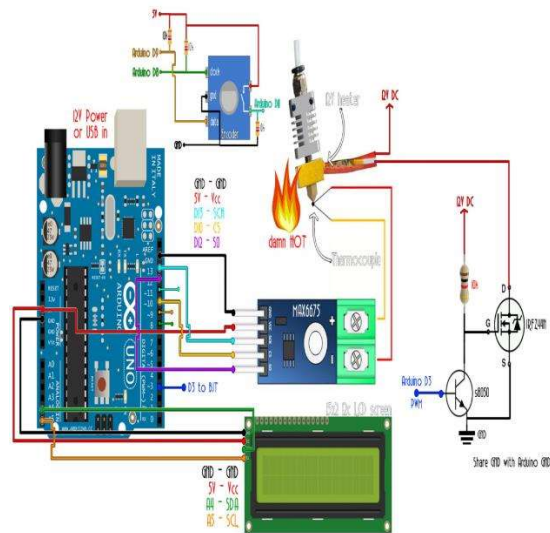
Nghiên cứu sử dụng dây đo nhiệt kiểu K TP-01. Hình 13 là dây đo nhiệt độ cặp nhiệt kiểu K -Type K. Là dây đo nhiệt độ được làm từ 2 loại vật liệu khác nhau hàn dính một đầu (thường là hợp kim kim loại) được hàn dính một đầu, khi nhiệt độ thay đổi tạo ra điện áp (mv) tỷ lệ với chênh h nhiệt độ giữa hai đầu của cặp dây dẫn. Dây đo này có dải đo từ -30°C đến 260°C . Dây đo nhiệt có nhiệm vụ thu nhận tín hiệu tại vị trí đầu gia nhiệt và đưa về bộ điều khiển trung tâm.



Hình 13. Dây đo nhiệt độ Type K TP-01

4.5. Sơ đồ đấu nối các thiết bị của bộ điều khiển nhiệt độ

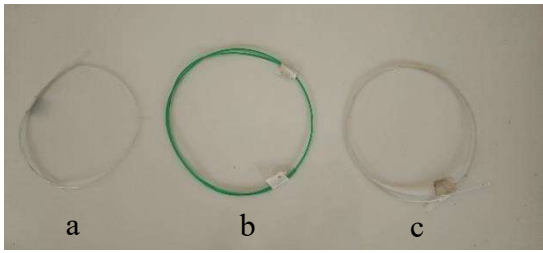
Sau khi thiết kế và lựa chọn các thiết bị cho hệ thống, nhóm nghiên cứu đã xây dựng lên sơ đồ đấu nối như trình bày trong Hình 14



Hình 13. Sơ đồ đấu nối hệ thống gia nhiệt của hệ thống tái chế chai nhựa thành chi in 3D

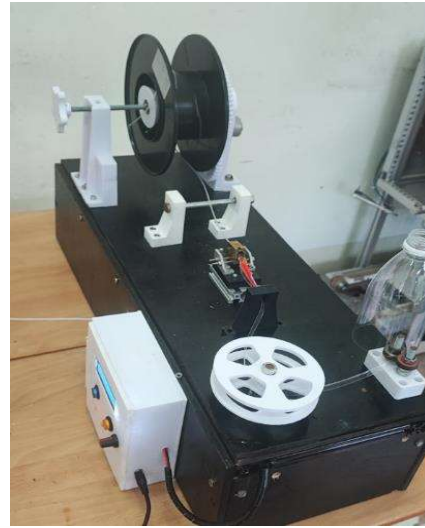
5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hệ thống tái chế chai nhựa thành sợi in 3D được tiến hành chế tạo các chi tiết, lắp ráp và cài đặt hoạt động tại xưởng thực hành Trường Đại học Hải Phòng. Kết quả được máy thực tế như Hình 14. Qua một thời gian sử dụng máy hoạt động tốt, đảm bảo các yêu cầu thiết kế đề ra. Thông số kỹ thuật của máy được trình bày trong bảng 2



Hình 14.. Các sản phẩm sợi in 3D được làm từ chai nhựa tái chế (a- từ chai lavie, b- từ chai 7 Up loại to, c- từ chai nước khoáng mặn)

Sau khi hệ thống được chế tạo hoàn thiện, nhóm nghiên cứu thực hiện vận hành để khảo sát độ chính xác của hệ thống so với thiết kế. Kiểm tra hoạt động của hệ thống tái chế chai nhựa thành sợi in 3D sau đó gia công một số loại chai nhựa khác nhau. Sản phẩm của quá trình làm việc của hệ thống đã chứng minh độ tin cậy của hệ thống đã thiết kế và chế tạo Hình 15.






Hình 14. Hệ thống tái chế chai nhựa thành sợi in 3D sau khi được chế tạo hoàn thiện

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của máy

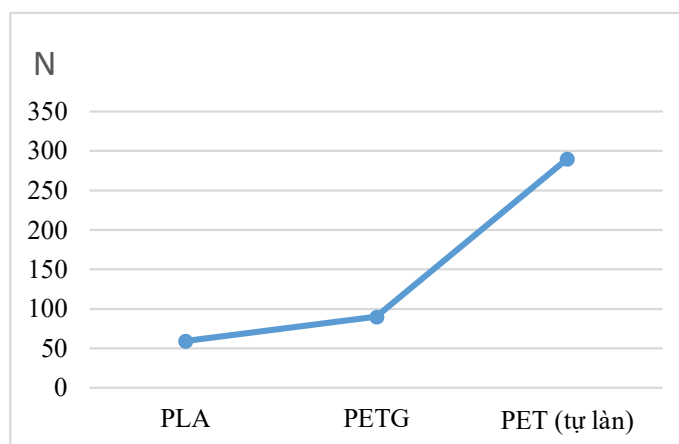
Đặc tính kỹ thuật	Thông số
Kích thước máy: Dài x Rộng x cao (mm)	666x226x150
Đường kính sợi kéo (nhỏ nhất và lớn nhất)	Đường kính nhỏ nhất :1.73mm Đường kính lớn nhất : 1.75mm
Động cơ tang cuốn (công suất, số vòng quay)	DC giảm tốc JGY370 (12V 45rpm)
Nhiệt độ gia nhiệt lớn nhất ($^{\circ}\text{C}$)	260
Tốc độ kéo sợi (nhỏ nhất, lớn nhất)	-Tốc độ nhỏ nhất (5mm/s) -Tốc độ lớn nhất (11mm/s)
Loại chai nhựa có thể kéo sợi	lavie, 7 Up, nước khoáng, trà xanh,...

Bảng 3. So sánh kết quả thực nghiệm thử kéo kiểm tra độ bền của 3 loại sợi in

STT	Loại nhựa	Lực kéo đứt (N)	Hình ảnh kết quả
1	PLA	59	
2	PETG	90	
3	PET(tự làm)	290	

Sau khi kéo thành công sợi in 3D làm từ chai nhựa tái chế (với thông số công nghệ: Nhiệt độ kéo 200⁰C, vận tốc kéo 9mm/s và độ dài khuôn kéo là 16,5mm), nhóm nghiên

cứu đã tiến hành thực nghiệm thử kéo kiểm tra độ bền của sợi in 3D do nghiên cứu chế tạo và cùng với 2 loại sợi in có trên thị trường, kết quả thể hiện trong Bảng 3



Hình 15. Biểu đồ so sánh độ bền của sợi in 3D tự làm với hai loại có sẵn trên thị trường

Từ kết quả thực nghiệm và qua biểu đồ Hình 15 ta thấy độ bền của sợi do nhóm nghiên cứu tạo ra cao hơn 3 lần (PETG) hoặc gần 5 lần (PLA). Theo tính toán giá thành để tạo ra sợi còn rẻ hơn nhiều so với giá thị trường của hai loại sợi in trên. Điều này cho thấy tính ưu việt của sợi in 3D do nhóm nghiên cứu tạo ra.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng được sơ đồ nguyên lý hoạt động của hệ thống tái chế chai nhựa thành chỉ in 3D. Thiết kế kết cấu và chế tạo thành công hệ thống theo thiết kế đã xây dựng. Tiến hành vận hành thử nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động tốt, đã tái chế thành công chỉ in 3D từ chai nhựa tái chế. Qua thử nghiệm độ bền của sợi in 3D làm từ chai nhựa tái chế do hệ thống tạo ra so với hai loại chỉ in phổ biến trên thị trường cho thấy sự vượt trội về độ bền của chỉ in do nghiên cứu tạo ra. Điều này cho thấy độ tin cậy của hệ thống tái chế chai nhựa thành chỉ in 3D.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. <https://www.tapchiconsan.org.vn/web/guest/bao-ve-moi-truong/-/2018/826009/rac-thai-nhua-o-viet-nam--thuc-trang-va-giai-phap.aspx>

2. A. Al Rashid, M. Koç, (2023), “Additive manufacturing for sustainability and

circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste”. Mater. Today Sustainab, Article 100529, 10.1016/j.mtsust.2023.100529

3. A. Vedrtnam, P. Ghabezi, D. Gunwant, Y. Jiang, O. Sam-Daliri, N. Harrison, J. Goggins, W. Finnegan, (2023), “Mechanical performance of 3D-printed continuous fibre Onyx composites for drone applications: an experimental and numerical analysis Composit”. Part C: Open Access, 12, Article 100418, 10.1016/j.jcomc.2023.100418

4. R. Kumar, M. Kumar, J.S. Chohan, (2021), “The role of additive manufacturing for biomedical applications: a critical review”. J. Manuf. Process., 64, pp. 828-850, 10.1016/j.jmapro.2021.02.022

5. T. Ritter, E. McNiffe, T. Higgins, O. Sam-Daliri, T. Flanagan, M. Walls, P. Ghabezi, W. Finnegan, S. Mitchell, N.M. Harrison, (2023), “Design and modification of a material extrusion 3D printer to manufacture functional gradient PEEK components Polym”. (Basel), 15, 10.3390/polym15183825

6. M. Nikam, P. Pawar, A. Patil, A. Patil, K. Mokal, S. Jadhav, (2023), “Sustainable Fabrication of 3D Printing Filament from Recycled PET Plastic”, Mater Today Proc, 10.1016/j.matpr.2023.08.205