

# NGHIÊN CỨU DÒNG CHẢY CỦA NHỰA NÓNG CHẢY TRONG THIẾT BỊ ĐÙN TRỤC VÍT ĐƠN

NGUYỄN KHOA TRIỀU\*, NGUYỄN THANH QUÝ, ĐOÀN NGỌC ANH THƯƠNG, NGUYỄN MINH HÙNG, LẠI NHƯ KIÊN, MAI TUẤN ĐỒNG

*Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh,*

*\*Tác giả liên hệ: nguyengkhoatrieu@iuh.edu.vn*

*DOIs: <https://doi.org/10.46242/jstiuh.v57i03.4384>*

**Tóm tắt.** Bài báo này trình bày nghiên cứu về dòng chảy của nhựa nóng chảy trong thiết bị đùn nhựa dùng trục vít đơn. Đặc tính dòng chảy của nhựa nóng chảy trong thiết bị đùn nhựa trục vít đơn tương tự như đặc tính dòng chảy của chất lỏng nhớt giữa hai tấm song song vô hạn, một tấm chuyển động và một tấm cố định. Giả thiết rằng nhựa nóng chảy là một lưu chất Newton, một phương trình vi phân diễn tả mối quan hệ giữa tốc độ đùn và áp suất tại đầu đùn với các thông số hình học của trục vít và nhựa đùn được thành lập. Từ đó, phương trình dòng chảy tích hợp được tìm ra cho một trường hợp khi độ nhớt của chất lỏng không đổi trong thiết bị đùn và đùn đẳng nhiệt. Những lý thuyết về đặc tính của dòng chảy này sau đó được dùng để thành lập phương trình tính đường kính trục vít và được kiểm nghiệm thông qua quá trình thiết kế và chế tạo một thiết bị đùn sợi nhựa cho máy in 3D.

**Từ khóa.** Thiết bị đùn trục vít đơn, đặc tính dòng chảy, chất lỏng Newton, máy đùn sợi nhựa, máy in 3D.

## 1. GIỚI THIỆU

Các kỹ thuật sản xuất dùng trục vít như đùn và ép phun đóng vai trò ngày càng quan trọng trong rất nhiều ngành công nghiệp như chất dẻo, thực phẩm cũng như làm thiết bị cấp liệu cho các thiết bị khác, và cũng sẽ được sử dụng rất nhiều nữa trong tương lai [1]. Trong nhiều loại thiết bị dùng trục vít được sử dụng trong công nghiệp, thiết bị đùn dùng trục vít đơn là loại được sử dụng nhiều nhất và được quan tâm nghiên cứu nhiều nhất [1]. Lý thuyết về thiết bị đùn dùng trục vít đơn đã được tập trung nghiên cứu hơn 70 năm qua [2]. Lý thuyết về dòng chảy của lưu chất trong thiết bị đùn trục vít đơn có thể được phân thành hai nhánh.

Thứ nhất, nhựa nóng chảy được xem là lưu chất Newton. Ngay từ những năm 50, J. F. Carley và R. A. Strub [2] đã có những nghiên cứu sâu về dòng chảy của nhựa nóng chảy trong một thiết bị đùn trục vít đơn dùng giả thiết lưu chất Newton. Nếu coi tỉ trọng của nhựa nóng chảy không bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ và nhựa nóng chảy không được tạo ra hay bị phá hủy bởi máy đùn thì năng suất máy đùn bằng dòng kéo (drag flow) trừ dòng áp suất (pressure flow) và trừ dòng rò (leak flow) [2]. Đây được gọi là phương trình liên tục của máy đùn và là phương trình cơ bản nhất mà rất nhiều nghiên cứu sau dựa vào. Tuy nhiên, khi tính toán dòng kéo (lưu lượng dòng chảy kéo) và dòng áp suất, các tác giả đề ra các hàm nhân tố hình dạng (shape factor). Còn khi tính dòng rò, tác giả cần phải tính hệ số  $E$ , hệ số điều chỉnh độ lệch tâm của trục vít trong thân máy đùn. Những sự tính toán bổ sung này làm việc tính toán các thông số của trục vít, đặc biệt là đường kính, rất khó khăn. Trong khi đó, cũng giả thiết rằng nhựa nóng chảy là một lưu chất bất khả nén, tác giả R.M. Griffith [3] dùng phương trình lũy thừa và phương pháp tích hợp Runge-Kutta để giải gần đúng. Kết quả là các phương trình này quá phức tạp để có thể được ứng dụng trong thực tế. Có một điểm lưu ý là có nhiều tác giả phát triển mô hình toán của riêng họ, không sử dụng phương trình liên tục của máy đùn. Một nghiên cứu điển hình là của các tác giả D. J. Weeks và W. J. Allen [4], rất công phu, gồm hai phần, phát triển lý thuyết dòng chảy Newton và kiểm nghiệm lại bằng thí nghiệm đùn lưu chất phi Newton, polythene. Độ chính xác của mô hình là trong phạm vi 25%, tuy nhiên mô hình quá phức tạp để ứng dụng vào thực tế. Tương tự như vậy, Y. Li và F.Hsiel [5] đã tự phát triển mô hình toán mới để tính toán dòng chảy của lưu chất Newton đẳng nhiệt và bất khả nén bên trong máy đùn trục vít đơn. Họ dùng tới 69 phương trình toán học để giải quyết vấn đề. Vậy nên, mô hình toán của họ cũng không có tính ứng dụng cao, không thể tính được đường kính trục vít. Tuy sau đó họ có nghiên cứu cải tiến, đơn giản hoá mô hình của mình, chỉ dùng 49 phương trình [1], nhưng mô hình toán vẫn chưa có tính ứng dụng cao. Tiếp theo, Campbell G.A. và các cộng sự [6] nghiên cứu dòng chảy của nhựa nóng chảy

trong một thiết bị đùn có đường kính trục vít  $D = 49,66$  mm. Tuy phương trình của họ khá đơn giản nhưng tính ứng dụng không cao vì bản thân đường kính trục vít là một thông số đầu vào, và cần phải ước lượng / đo được lực kéo và phản lực tác dụng lên trục vít. Tiếp nối các nghiên cứu của mình, J. F. Carley và các cộng sự [7] đã tìm ra được lý thuyết đơn giản hóa cho dòng chảy của lưu chất Newton trong máy đùn trục vít đơn dùng phương trình vi phân riêng phần. Từ những tính toán và thí nghiệm trước đây, họ nhận thấy rằng dòng rò chiếm tỷ lệ rất nhỏ so với các dòng khác nên có thể bỏ qua. Do đó, các phương trình của họ đơn giản hơn rất nhiều. Từ các phương trình này, ta có thể ứng dụng để tính đường kính của trục vít một cách dễ dàng nếu biết được áp suất tại đầu đùn. Đồng thời, vì đường kính của trục vít thay đổi theo vị trí chức năng của nó, họ cũng phát triển phương trình cho trường hợp đường kính trục vít là hàm của vị trí dọc theo chiều dài của nó. Gần đây, Christian Marschik và các đồng nghiệp cũng dùng lý thuyết lưu chất Newton để thực hiện nghiên cứu của họ. Công bố của họ được chia làm 2 phần, phần A [8] là những nghiên cứu sâu về lý thuyết dòng chảy để làm giảm độ phức tạp của mô hình toán, phần B [9] trình bày những phát triển mới về dòng chảy kéo trong máy đùn trục vít đơn. Thông số đầu vào quan trọng của họ là đường kính của trục vít, 35 mm, kết quả đầu ra là các phương trình mô tả dòng chảy lưu chất, khó ứng dụng vào thực tế.

Thứ hai, nhựa nóng chảy được xem là lưu chất phi Newton. Thực tế cho thấy, phần lớn nhựa nóng chảy là lưu chất phi Newton và do đó, giả thiết chúng có đặc tính Newton sẽ dẫn tới sai số đáng kể [10]. Do đó, các lý thuyết về dòng chảy lưu chất trong máy đùn trục vít được mở rộng để xử lý lưu chất phi Newton. Từ đầu thập niên 60, đã có công trình nghiên cứu của P. H. Squires [11] giả thiết dòng lưu chất trong máy đùn trục vít là phi Newton và bất đẳng nhiệt. Vì lưu chất được đùn ra là phi Newton, độ nhớt sẽ thay đổi ở các vị trí khác nhau trong máy đùn do sự biến thiên của tốc độ cắt. Cùng với đó, tác giả đề xuất tính hệ số hiệu chỉnh  $F_{DC}$  cho hình dạng cánh vít. Do đó, tuy sử dụng phương trình liên tục của máy đùn nhưng các kết quả của tác giả này khá phức tạp, chưa phù hợp cho áp dụng trong thực tế. Cũng dùng lý thuyết về lưu chất phi Newton và bất đẳng nhiệt, nhưng R. T. Fenner và J. G. Williams [12] dùng hàm lũy thừa để biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất cắt  $\tau$  và tốc độ cắt  $\gamma$ . Do đó, các phương trình vi phân riêng phần của nghiên cứu này rất khó đưa vào tính toán trong thực tiễn thiết kế. Trong một công trình nghiên cứu khác, R. Brzoskowski và các cộng sự [13] trình bày một mô hình toán mà họ cho là đơn giản để biểu diễn dòng chảy đẳng nhiệt phi Newton cho vùng định lượng của trục vít. Các tác giả sử dụng một trục vít có đường kính 1,5" cho nghiên cứu. Và từ mô hình toán này, ta không thể tính ngược lại đường kính trục vít theo yêu cầu. Do đó, chúng không có tính ứng dụng cao cho công tác thiết kế. Nhiều tác giả khác cũng sử dụng lý thuyết lưu chất phi Newton cho các nghiên cứu của mình. Acur, E.E. và Vlachopoulos, J. [14] dùng lý thuyết lưu chất phi Newton để mô phỏng số quá trình đùn trục vít, qua đó thành lập các phương trình vi phân riêng phần mô tả khối lượng, mô men, năng lượng của nhựa nóng chảy. Một trục vít có đường kính 38 mm được sử dụng như nhân tố đầu vào chủ chốt. Nhưng ở chiều ngược lại, việc tính toán đường kính từ các phương trình vi phân riêng phần trên là rất phức tạp. Còn tác giả C. Rauwendaal [10] thì dùng phần mềm phần tử hữu hạn để phân tích dòng chảy và truyền nhiệt của nhựa nóng chảy trong máy đùn. Và những phân tích này khó có thể lặp lại tại hiện trường sản xuất. Cũng là mô phỏng, hai tác giả Wang, Y. và Tsay, C.C. đến từ Đài Loan thì dùng phương pháp lặp Newton-Raphson để giải phương trình lũy thừa nhằm nghiên cứu các chế độ phối trộn trong máy đùn, Maddock, Dulmage và đảo vòng (blister ring) [15]. Hai tác giả này sử dụng một vít đùn có đường kính 35 mm. Và do mục đích nghiên cứu là để mô hình hóa dòng chảy của nhựa nóng chảy để nghiên cứu sự phối trộn, các kết quả này không thể trực tiếp ứng dụng cho công tác thiết kế. Các tác giả Naksoo Kim và các cộng sự [16] cũng dùng phần mềm phần tử hữu hạn nhưng sử dụng mô hình Carreau-Yasuda cho độ nhớt của nhựa nóng chảy và dùng phương pháp số Runge-Kutta tích hợp bậc hai để giải. Những phân tích này chỉ dừng lại trên phần mềm máy tính mà không có thực nghiệm hay kiểm chứng khác. Cũng tương tự như vậy, trong [17], Marschik, Christian và các cộng sự mô phỏng 3D dòng chảy phi Newton của polymer nóng chảy có độ nhớt tỷ lệ nghịch với áp lực (shear-thinning polymer melt). Và tổ hợp của các hàm vi phân riêng phần và hàm đa thức bậc ba trong nghiên cứu này hạn chế khả năng ứng dụng của nó trong việc tính chọn đường kính trục vít. Còn Wilczyński, Krzysztof và các cộng sự đến từ Ba Lan [18] thì mô phỏng quá trình đùn composite nhựa-gỗ. Mô hình mà họ đưa ra có thể dự đoán được năng suất đùn, áp suất và nhiệt độ, quá trình nóng chảy cũng như năng lượng tiêu thụ. Họ cũng đã làm thí nghiệm kiểm chứng dùng một trục vít có đường kính 45 mm. Tuy nhiên, ở chiều ngược lại, không thể tính được đường kính của trục vít từ các thông số như năng suất đùn, áp suất và nhiệt độ nên nghiên cứu này không thể dùng cho công tác thiết kế, chế tạo. Sau đó, các tác

giả này tiếp tục cải tiến mô hình toán của họ trong công bố tiếp theo [19]. Tuy nhiên, do mục tiêu nghiên cứu, mô hình toán của họ, ngoài tính học thuật thì giá trị thực tiễn chưa cao.

Một điểm cần lưu ý là nhiều công trình nghiên cứu dùng cả lý thuyết dòng chảy Newton và phi Newton. Trong [4], nghiên cứu của các tác giả D. J. Weeks và W. J. Allen gồm hai phần, phát triển lý thuyết dòng chảy Newton và kiểm nghiệm lại bằng thí nghiệm đùn lưu chất phi Newton, polythene. Hay tác giả Vlachopoulos, J. trong [20], nghiên cứu vai trò của tính lưu biến trong quá trình đùn polymer. Tác giả đã chỉ ra rằng, một trong những đặc tính đáng chú ý của các chất lỏng cao phân tử (polymeric liquids) là độ nhớt tỷ lệ nghịch với áp lực (shear-thinning), còn được gọi là giả dẻo (pseudo-plastic behavior). Nếu chúng ta tăng tốc độ cắt (tức là đùn nhanh hơn qua khuôn), độ nhớt sẽ giảm đi. Cũng tức là trong tính toán, việc giả thiết nhựa nóng chảy có đặc tính Newton sẽ gây ra sai số. Cũng cần lưu ý rằng, việc giả thiết nhựa nóng chảy có đặc tính Newton sẽ không tính được đường kính sợi nhựa thực sau khi đùn. Hay trong các bài báo tổng quan về quá trình đùn, ví dụ như trong [21]. Ở đây, các tác giả đã tổng hợp và phân tích 77 công trình nghiên cứu về quá trình đùn, cả dùng lý thuyết về lưu chất Newton và phi Newton. Thông qua cái nhìn tổng quan này, ta có thể nhận thấy hầu hết các nghiên cứu dùng lý thuyết về lưu chất phi Newton đều có mô hình toán khá phức tạp, tuy có tính học thuật cao song khó đưa vào giảng dạy đại trà trong môi trường đại học hay cho kỹ sư hiện trường sản xuất tính chọn đường kính trục vít.

Như đã nói ở trên, kỹ thuật đùn trục vít được ứng dụng rất nhiều cả trong công nghiệp lẫn dân dụng. Trong đó, kỹ thuật đùn trục vít được ứng dụng rất nhiều trong một công nghệ rất được chú ý hiện nay, công nghệ in 3D, để sản xuất sợi nhựa cho máy in.

In 3D là công nghệ sản xuất vật thể bằng cách đắp vật liệu theo lớp. Trong đó, mỗi lớp là một mặt cắt ngang mỏng của vật thể đó, được tạo ra bằng máy tính [22]. Ưu điểm vượt trội của công nghệ in 3D là có thể rút ngắn thời gian, sản xuất nhanh sản phẩm với số lượng nhỏ, giúp đẩy nhanh quá trình đưa sản phẩm ra thị trường; giảm bớt chi phí với chất lượng tốt hơn, mẫu mã đẹp hơn; đơn giản, tự động hóa; tối ưu hóa quá trình kiểm tra và chỉnh sửa sản phẩm (điều khiến in 3D trở thành công nghệ “như mơ”, chính là khả năng tạo sản phẩm thật trực tiếp từ bản vẽ). Với công nghệ này, có thể chế tạo vật thể có kết cấu đặc biệt phức tạp, đòi hỏi tinh xảo, chính xác mà các phương pháp gia công truyền thống không thể làm được. Không những vậy, công nghệ in 3D gần như không có chất thải của vật liệu xây dựng hay giàn giáo; giúp công nhân bảo vệ được sức khỏe; giảm chi phí vận chuyển, và bớt đi sự tác động, phát thải khí CO<sub>2</sub> ra môi trường trong quá trình vận chuyển. Công nghệ in 3D đã có những bước phát triển đầy triển vọng - đó là công nghệ của tương lai, biến tất cả các ý tưởng của con người thành hiện thực [23]. Có thể nói rằng công nghệ in 3D là công nghệ chủ lực của cách mạng công nghiệp 4.0.

Trong tình hình đó, đã có khá nhiều nghiên cứu về thiết kế, chế tạo máy đùn sợi nhựa cho máy in 3D. Ở một chương trong một quyển sách chuyên về gia công cộng vật liệu [24], Kamaljit Singh Boparai và Rupinder Singh trình bày quá trình thiết kế và chế tạo một thiết bị đùn sợi nhựa cho máy in 3D FDM (fused deposition modeling). Thiết bị có đường kính trục vít 25 mm. Tuy nhiên, các tác giả này không trình bày quá trình tính toán để ra được thông số này. Còn các tác giả Harimalairajan.K và các cộng sự đến từ Ấn Độ [25] thì chế tạo một máy đùn sợi nhựa cho máy in 3D có trục vít khá lớn 65 mm, tốc độ quay của trục vít của trục vít là 20 vòng / phút. Theo các tác giả, máy có giá thành khá rẻ, 18500 Rs (khoảng 5,86 triệu VNĐ) nhưng có thể đùn tất cả các loại nhựa nhiệt dẻo, trừ PVC. Tuy vậy, các tác giả cũng không trình bày các bước tính toán thiết kế các chi tiết máy. Với giá thành đắt hơn, khoảng gần 700 USD, Aubrey L. Woern và các cộng sự [26] đã phát triển một hệ thống đùn nhựa tái chế, bao gồm cả hệ thống quấn sợi nhựa sau khi được đùn ra. Máy có thể tạo sợi nhựa từ các loại polymer với nhiệt độ đùn có thể lên tới 250°C. Do đó, máy có thể hoạt động với hầu hết các loại nhựa nhiệt dẻo và composite, phù hợp cho việc nghiên cứu vật liệu mới cũng như tái chế. Năng suất máy đùn là 0,4 kg/h, sử dụng năng lượng 0,24 kWh/kg. Tuy vậy, như trên, các tác giả này cũng không trình bày vì sao trục vít có đường kính 5/8“. Cũng là để tái chế nhựa, trong [27], Mazher Iqbal Mohammed và các cộng sự đã tự phát triển một thiết bị tái chế nhựa ABS từ các đồ điện tử. Thiết bị của họ sử dụng năng lượng mặt trời để hướng tới in 3D thân thiện với môi trường (ecoprinting hoặc eco-friendly printing). Trong [27], các tác giả này cũng không trình bày về quá trình tính toán thiết kế trục vít. Cũng hướng tới thân thiện với môi trường, Sean Whyman và các cộng sự [28] đã phát triển một máy in 3D dùng nhựa sinh học dạng hạt. Khác với máy in 3D FDM thông thường cùng các bánh răng hay bánh xe để đẩy sợi nhựa xuống đầu in, máy in 3D dùng vật liệu dạng hạt dùng trục vít. Đây thực chất là một thiết bị đùn trục vít có đường kính 15 mm. Và trong phần thiết kế trục vít của họ không trình bày các công thức tính toán để được đường kính này. Còn trong số tay

về tính toán thiết bị đun, chương thiết kế trục vít [29], đường kính trục vít được chọn dựa trên một đồ thị với thông số đầu vào là năng suất đun pounds / giờ. Trục này có tỷ lệ theo hàm log nên việc tra bảng không chính xác hoàn toàn. Trục hoành là giá trị đường kính trục vít, từ 1 đến 8 inches, muốn tìm các giá trị nhỏ hơn hay lớn hơn đều phải ước lượng. Đặc biệt là, các tác giả không trình bày cơ sở lý thuyết để được đồ thị này.

Như đã trình bày, các nghiên cứu về dòng nhựa nóng chảy trong thiết bị đun hầu hết đều có giá trị học thuật rất cao, do đó, đều khá phức tạp. Nhằm ứng dụng chúng vào tính toán thiết kế trục vít máy đun, phương trình liên tục của quá trình đun được sử dụng với giả thiết lưu chất Newton. Từ đó, phương trình dòng chảy tích hợp được tìm ra cho một trường hợp khi độ nhớt của chất lỏng không đổi trong thiết bị đun và đun đẳng nhiệt. Tiếp theo, từ phương trình này, đường kính trục vít được tính và chọn dựa trên một số yêu cầu đầu vào là yêu cầu thiết kế. Các phương trình này sau đó được kiểm nghiệm thông qua quá trình tính toán thiết kế trục vít cho một thiết bị đun sợi nhựa cho máy in 3D. Kết quả cho thấy, công thức tính đường kính trục vít được thành lập có thể được ứng dụng cho các bạn sinh viên hay các kỹ sư hiện trường sản xuất ứng dụng tính chọn đường kính trục vít, và từ đó tính các thông số khác của máy đun.

## 2. LÝ THUYẾT DÒNG CHẢY CỦA NHỰA NÓNG CHẢY

### 2.1. Lưu chất Newton

Từ rất sớm, người ta đã phát hiện ra rằng lưu chất giữa hai tấm phẳng song song, một tấm cố định và một tấm chuyển động, thì một ít chất lỏng bị kéo bởi tấm chuyển động. Newton đã đề ra khái niệm ứng suất cắt (shear stress),  $\tau$ , giữa hai lớp chất lỏng chuyển động kề bên nhau thì tỷ lệ với gradien vận tốc hoặc tốc độ cắt,  $ds/dy$  [2].

$$\tau = \mu \frac{ds}{dy} \quad (1)$$

Một lưu chất mà dòng chảy của nó thỏa mãn **phương trình (1)** được gọi là lưu chất Newton. Và hằng số tỷ lệ,  $\mu$ , được gọi là hệ số độ nhớt hay đơn giản là độ nhớt của lưu chất. Độ nhớt của lưu chất tỷ lệ nghịch với nhiệt độ. Với nhiều loại lưu chất, giá trị  $\mu$  không phải là hằng số mà phụ thuộc vào tốc độ cắt hoặc ứng suất cắt. Còn ở một vài loại lưu chất, giá trị  $\mu$  bị ảnh hưởng bởi thời gian mà lưu chất chịu ứng suất.

### 2.2. Dòng chảy của lưu chất trong máy đun trục vít đơn

Cơ chế dòng chảy của chất lỏng nhớt trong kênh xoắn của trục vít có thể được hiểu rõ hơn nếu ta giả định kênh dẫn được mở ra và trải lên một mặt phẳng. **Hình 1** thể hiện sơ đồ giả định cho ý tưởng này. Tấm dưới đại diện cho bề mặt trục vít, được giữ cố định còn tấm trên đại diện cho bề mặt thân máy, được di chuyển theo hướng mũi tên. Chuyển động tương đối sẽ giống như những gì xảy ra trong máy đun khi mà thân máy đứng yên, còn trục vít quay. Giả sử chất lỏng làm ướt cả hai bề mặt, chuyển động của thân máy sẽ kéo theo chất lỏng nhớt. Trong khi mặt đứng yên tạo ra lực cản ngược chiều và bằng với lực kéo. Vận tốc của chất lỏng, so với trục vít đạt cực đại ở bề mặt thân máy và bằng 0 trên bề mặt trục vít. Ngoài ra, còn có một nhân tố có liên quan, là hướng dòng chảy, vì kênh dẫn nghiêng một góc so với hướng chuyển động. Do đó, khi tính toán tốc độ dòng chảy trong kênh dẫn, ta chia vận tốc thành hai thành phần: một tác động trực tiếp xuống kênh dẫn, một tác động theo hướng vuông góc. Ta gọi thành phần tác động xuống kênh dẫn là vận tốc kéo, còn thành phần tác động vuông góc là vận tốc ngang. Ở cuối kênh dẫn thường có khuôn hoặc một cái gì đó tương tự làm hạn chế dòng chảy. Điều này tạo nên một sự chênh áp (gradient áp suất), gây ra một dòng chảy ngược hướng với dòng kéo. Ta gọi đây là dòng áp suất. Ta còn một dòng chảy nữa cần được lưu ý. Thông thường, trục vít không vừa khít 100% với thân máy. Nói cách khác, có một khe hở giữa đỉnh vít và bề mặt thân máy. Vì có sự chênh áp dọc trục vít, vật liệu nhớt sẽ có xu hướng rò qua những khoảng trống này. Ta gọi đây là dòng rò.

Trong **hình 1**,  $U$  là vận tốc dài của trục vít hay là chuyển động tương đối giữa trục vít và thân máy,  $\phi$  là góc nghiêng cánh vít.

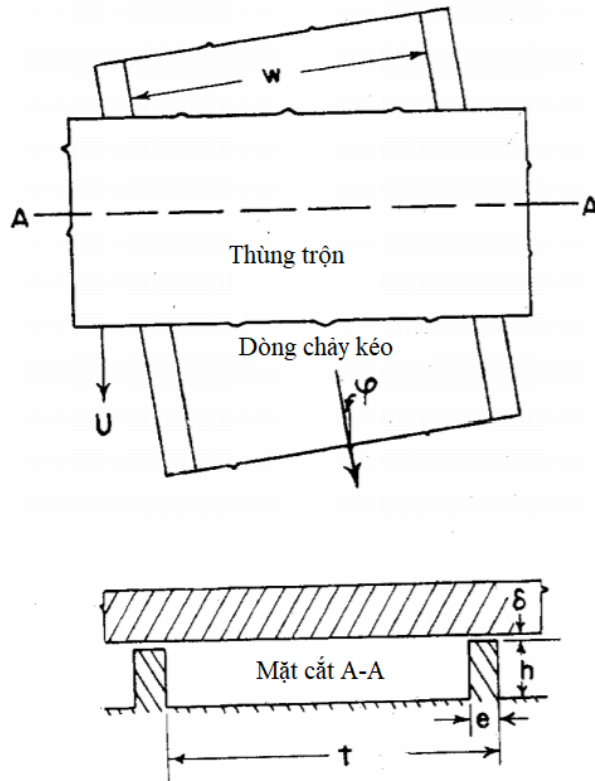
Năng suất của máy đun bằng tổng đại số của dòng kéo ( $Q_D$ ), dòng áp suất ( $Q_P$ ) và dòng rò ( $Q_L$ ). **Phương trình (2)** là phương trình dòng chảy của máy đun, đây thật ra là phương trình cân bằng vật chất dựa theo giả thiết lưu chất không nén được [7].

$$Q = Q_D - Q_P - Q_L \quad (2)$$

Ta bỏ qua dòng rò, vì giá trị của nó thường rất nhỏ so với những dòng khác [4]. Vận tốc của chất lỏng tại bất kỳ điểm nào trong kênh dẫn của trục vít thay đổi theo độ sâu và vị trí của điểm đó. Sự phân bố vận tốc hai chiều này dẫn đến **phương trình 3**:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \quad (3)$$

Đây là phương trình vi phân do Navier thiết lập năm 1822, là phương trình dòng chảy tổng quát cho những lưu chất Newton [2]. Trong đó  $z$  là khoảng cách được đo dọc theo trục xoắn của kênh nên  $dP/dz$  là độ tăng áp suất dọc theo chiều dài trục vít,  $v$  là vận tốc của bất kỳ điểm nào trong kênh.



Hình 1: Sơ đồ kênh dẫn của trục vít.

Những phương trình dòng chảy này có thể được đơn giản hóa đáng kể nếu giả định rằng ảnh hưởng của thành kênh lên sự phân bố vận tốc là không đáng kể. Nói cách khác, ta đơn giản hóa bằng cách giả định rằng trường hợp đặc biệt của các tấm song song vô hạn được áp dụng vào trong bài toán. Điều này làm cho phân phối vận tốc trở thành một chiều. Sai số do sự xấp xỉ này khá nhỏ đối với các trục vít có kênh dẫn nông. Khi tỷ số chiều rộng và chiều sâu lớn hơn hoặc bằng 10, sai số sẽ nhỏ hơn 10% [7]. Hầu hết trục vít dùng để đùn nhựa đều thuộc loại này, và do đó các phương trình dòng chảy được đơn giản hóa rất có giá trị cho công việc thiết kế thực tế và nhiều ứng dụng khác.

Phương trình vi phân cho phân bố vận tốc một chiều thu được từ **phương trình (3)** bằng cách cho đạo hàm cấp 2 vận tốc tương ứng với  $x$  bằng 0. **Phương trình (3)** được rút gọn thành [2]:

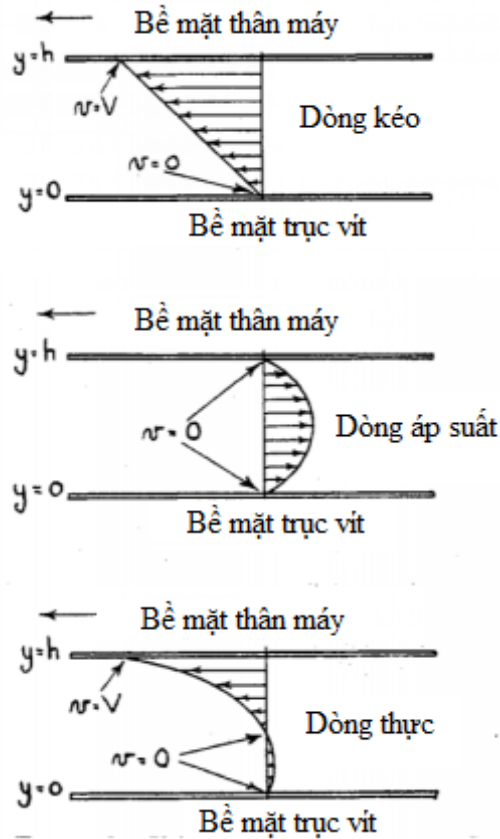
$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \quad (4)$$

Bằng cách tích phân hai lần **phương trình (4)**, ta sẽ có **phương trình (5)** – vận tốc tại điểm bất kỳ trên kênh dẫn trong máy đùn:

$$v = \frac{Vy}{h} + \frac{(y^2 - hy)}{2\mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \quad (5)$$

NGHIÊN CỨU DÒNG CHẢY CỦA NHỰA NÓNG CHẢY...

Các hằng số tích phân được đánh giá theo các điều kiện biên.  $h$  là chiều cao cánh vít. Trên bề mặt thân máy, khi  $y = h$ , vận tốc lưu chất, so với trục vít là  $V$ , và ở góc trục vít, khi ta có  $y = 0$ , vận tốc lưu chất bằng 0. Số hạng đầu của vế phải **phương trình (5)** là vận tốc dòng kéo và số hạng thứ 2 là vận tốc dòng áp suất. **Hình 2** trình bày biên dạng vận tốc của các dòng này. Trong dòng kéo, vận tốc thay đổi tuyến tính theo chiều sâu của kênh. Trong khi đó, ở dòng áp suất, ta có phân bố parabol. Tổng hai dòng chảy này cho ta biết vận tốc thực tại mỗi điểm.



Hình 2: Phân phối tốc độ trong kênh dẫn trục vít

Phương trình lưu lượng thể tích dòng chảy có thể được tạo ra từ phương trình vận tốc bằng cách lấy tích phân diện tích - vận tốc từ đỉnh xuống đáy kênh dẫn trục vít. Các **phương trình (6), (7), (8)** thể hiện quá trình này:

$$Q = \int_0^h y w dy \tag{6}$$

$$Q = w \int_0^h \left[ \frac{Vy}{h} + \frac{(y^2 - hy)}{2\mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \right] dy \tag{7}$$

$$Q = \frac{Vwh}{2} - \frac{wh^3}{12\mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \tag{8}$$

Với  $w$  là chiều rộng của kênh dẫn được đo theo đường vuông góc với trục nghiêng của cánh vít, góc nghiêng của cánh vít được ký hiệu là  $\varphi$ . Ở **phương trình (8)**, số hạng đầu tiên của vế phải là tốc độ dòng kéo và tiếp theo là tốc độ dòng áp suất.

**Phương trình (8)** có thể đưa về dạng tiện lợi hơn nếu ta xét hình dạng của ren vít. Trục vít có nhiều hơn hoặc bằng 1 cánh vít cũng có thể được xem xét. **Hình 3** thể hiện giản đồ của một trục vít hai cánh vít (loại trục vít nhiều cánh đơn giản nhất). Nếu ren từ một bên vít có chiều dài bằng khoảng cách giữa 2 đỉnh vít

được trải dài ra khỏi góc vít và nằm phẳng, thì sẽ được thể hiện như **hình 3**. Từ hình dạng của **hình 3**, các quan hệ tổng quát sau đây có thể được thiết lập cho các trục vít với số cánh vít bất kỳ [7].

$$V = U \cos \varphi = \pi D N \cos \varphi \quad (9)$$

$$nw = (t - ne) \cos \varphi \quad (10)$$

$$w = \left( \frac{t}{n} - e \right) \cos \varphi \quad (11)$$

$$dz = \frac{d\lambda}{\sin \varphi} \quad (12)$$

Với  $e$  là độ dày của cánh vít,  $\lambda$  là biến số khoảng cách, tính theo dọc trục vít và tăng về hướng khuôn đùn,  $N$  là vận tốc quay của trục vít. Thay thế các **phương trình (9), (11) và (12)** vào **phương trình (8)**, với  $n$  là số cánh vít song song thì phương trình đơn giản hóa của lý thuyết dòng chảy trở thành:

$$Q = \frac{n\pi D N h \left( \frac{t}{n} - e \right) \cos^2 \varphi}{2} - \frac{nh^3 \left( \frac{t}{n} - e \right) \sin \varphi \cos \varphi}{12\mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \quad (13)$$

Trường hợp đặc biệt phổ biến nhất của **phương trình (13)** là trường hợp một trục vít cánh vít đơn có chiều rộng cánh vít nhỏ so với bước vít.

Như ta thấy trong **hình 3**, khoảng cách giữa 2 đỉnh vít được tính từ đường kính và góc nghiêng bởi công thức:

$$t = \pi D \tan \varphi \quad (14)$$

Thay thế **phương trình (14)** vào **phương trình (13)**, ta được **phương trình (15)** áp dụng cho trường hợp đặc biệt của trục vít cánh vít đơn ( $n = 1$ ) trong đó chiều rộng ren được bỏ qua.

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 N h \sin \varphi \cos \varphi}{2} - \frac{\pi D h^3 \sin^2 \varphi}{12\mu} \left( \frac{dP}{dz} \right) \quad (15)$$

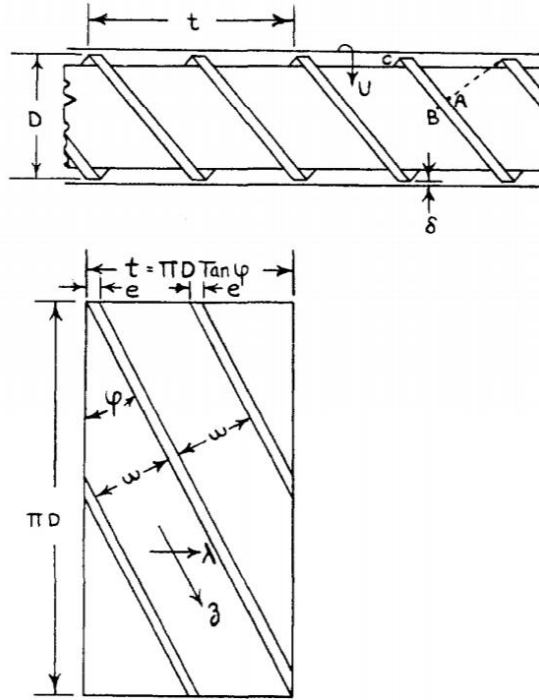
Ở **phương trình (15)**, dòng rò đã được bỏ qua. Dòng rò được coi như một dòng áp suất qua một khe hẹp dài. Đối với đùn đẳng nhiệt và kích thước kênh dẫn đồng nhất, dòng rò tại mọi điểm trên đỉnh ren là không đổi. Do đó, tổng lưu lượng dòng rò có thể tính được bằng cách tính toán lượng rò rỉ trên một đoạn ren có chiều dài bằng một vòng của đường xoắn. Dạng của phương trình dòng rò phải giống với phương trình dòng áp suất, vì ta đang giả định cơ chế hai dòng giống nhau. Do đó, dòng rò tỷ lệ thuận với chiều rộng của khe, tỷ lệ thuận với lũy thừa bậc ba của chiều cao khe và tỷ lệ nghịch với chiều dài của kênh dẫn. Chiều dài, chiều rộng và chiều cao của khe có thể suy ra từ **hình 3**. Chiều cao của khe là  $\delta$ . Chiều dài của khe sẽ là  $e \cos \varphi$ . Chiều rộng của khe là  $\pi D / \cos \varphi$ .

Vì thế, phương trình dòng rò sẽ là:

$$Q_L = \frac{\pi D \delta^3 E \Delta p}{12\mu e \cos^2 \varphi} \quad (16)$$

Trong đó,  $\Delta p$  là độ lệch áp suất từ bên này sang bên kia của ren vít. Trong **hình 3** thể hiện sự chênh lệch áp suất từ điểm A đến điểm B.  $E$  là hệ số lệch tâm – được gán giá trị là 1. Sẽ dễ cho việc tính toán hơn khi thay độ lệch áp suất trên một đỉnh vít  $\Delta p$  bằng độ lệch áp suất trên toàn bộ trục vít  $\Delta P$ . Đầu tiên, độ lệch áp suất  $\Delta P_1$  qua chiều dài kênh dẫn bằng với 1 vòng xoắn được tính như sau [2]:

$$\Delta P_1 = \frac{\Delta P}{\text{số'vòngxoắn}'n} = \frac{t\Delta P}{L} = \frac{\pi D \tan \varphi \Delta P}{L} \quad (17)$$



Hình 3: Hình dạng hình học trục vít.

Trong **hình 3**,  $\Delta P_I$  là độ lệch áp suất từ điểm A đến điểm C. Tuy nhiên, trong **phương trình (16)**, ta vẫn cần độ lệch áp suất từ điểm A đến điểm B. Vì độ chênh áp trong kênh dẫn trục vít là tuyến tính,  $\Delta p$  có thể được tính từ  $\Delta P$  bằng cách nhân  $\Delta P_I$  với tỷ số giữa khoảng cách dọc kênh xoắn C-A với khoảng cách B-A [7].

$$\Delta p = \frac{\pi D \tan \varphi \Delta P}{L} \left( \frac{\frac{\pi D}{\cos \varphi} - \pi D \sin \varphi \tan \varphi}{\frac{\pi D}{\cos \varphi}} \right) = \frac{\pi D \tan \varphi \cos^2 \varphi \Delta P}{L} \quad (18)$$

Với  $L$  là chiều dài phần trục vít có cánh vít. Thay **phương trình (18)** vào **phương trình (16)** và gán giá trị  $E$  bằng 1 công thức dòng rò sẽ được viết thành:

$$Q_L = \frac{\pi D \delta^3 \tan \varphi \Delta P}{12 \mu L} \quad (19)$$

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Công thức tính toán đường kính trục vít

Từ **phương trình (15)**, ta xác định được lưu lượng dòng chảy kéo hay dòng dọc trục như sau:

$$Q_D = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N h \sin \varphi \cos \varphi (cm^3 / s) \quad (20)$$

Và lưu lượng dòng áp suất:

$$Q_P = \frac{1}{12 \mu} \pi D h^3 \sin^2 \varphi \left( \frac{dP}{dz} \right) (cm^3 / s) \quad (21)$$

Thông thường, dòng rò có giá trị nhỏ và được bỏ qua [2, 7, 30].

Trong [30], các tác giả cũng bỏ qua dòng rò và nghiên cứu tỷ số  $\Phi$  giữa dòng chảy kéo và dòng áp suất. Khi đó, phương trình tổng lưu lượng hay phân bố vận tốc của dòng nhựa nóng chảy trong kênh dẫn của



trục vít sẽ có dạng parabol theo vị trí  $y$  và phụ thuộc vào  $\Phi$ . Tại thân trục vít ( $y = 0$ ) thì vận tốc dòng chảy bằng 0. Khi  $\Phi = 0$  ( $Q_p = 0$ ), biên dạng vận tốc có dạng tuyến tính vì lúc này chỉ còn dòng chảy kéo. Khi  $\Phi > 0$ , biên dạng vận tốc từ đường thẳng chuyển thành parabol. Khi  $\Phi = 1/3$ , đỉnh của đường parabol sẽ bắt đầu đi qua đường zero về hướng ngược với hướng trục vít đẩy nhựa đi, hay nói cách khác, về phía thân máy, dòng nhựa chuyển động về phía trước; còn về phía thân trục vít, dòng nhựa chảy ngược về phía sau. Khi  $\Phi > 1/3$  (khoảng 2/3), hiện tượng này có thể được quan sát rất rõ [30]. Do đó, trong tính toán thiết kế trục vít, người ta có thể lấy giá trị này khoảng 0,2 [30]. Khi  $\Phi = 1$ , dòng áp suất sẽ cân bằng với dòng kéo và tổng lưu lượng bằng 0.

Sau đó, thay (20) và (21) vào (2), ta được:

$$Q = 0,4\pi^2 D^2 N h \sin \varphi \cos \varphi (cm^3 / s) \quad (22)$$

**Phương trình (22)** chính là năng suất của máy đùn. Nếu yêu cầu đầu vào của thiết kế là năng suất của máy, từ **phương trình (22)**, ta có thể tính được đường kính của trục vít cần thiết để thỏa mãn yêu cầu trên. Từ đó, ta có thể chọn mua loại trục vít hiện có trên thị trường đáp ứng được yêu cầu thiết kế. Từ **phương trình (22)**, ta được phương trình tính đường kính trục vít:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{0,4\pi^2 N h \sin \varphi \cos \varphi}} (cm) \quad (23)$$

### 3.2. Thiết kế kiểm nghiệm thiết bị đùn sợi nhựa cho máy in 3D

#### 3.2.1. Tính toán đường kính trục vít

Yêu cầu thiết kế cần đạt được của máy là vận tốc đùn từ 100 ÷ 200 mm / phút; đường kính sợi nhựa là 1,75±0,1 mm.

Như vậy vận tốc đùn:

$$v = 100 \div 200 (mm / ph) = \frac{1}{6} \div \frac{1}{3} (cm / s) \quad (24)$$

Tiết diện mặt cắt ngang của sợi nhựa, tính theo kích thước danh nghĩa:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0,175^2}{4} = 0,024 cm^2 \quad (25)$$

Từ (23) và (24) ta tính được năng suất cần thiết của máy đùn sợi nhựa:

$$Q = v \times F = 4 \times 10^{-3} \div 8 \times 10^{-3} (cm^3 / s) \quad (26)$$

Với  $Q = 4 \times 10^{-3} cm^3/s$ , thay vào (23) ta được  $D = 0,69 cm$ ;

Với  $Q = 8 \times 10^{-3} cm^3/s$ , thay vào (23) ta được  $D = 0,87 cm$ .

Lưu ý rằng  $H$  là độ sâu rãnh vít trong vùng bơm và định lượng,  $H = 0,2D$  và  $\varphi$  là góc nghiêng của răng vít (helix angle),  $\varphi = 17,6^\circ$  [30].

Như vậy,  $D = 0,69 \div 0,87 cm = 6,9 \div 8,7 mm$ . Do đó, việc chọn mua trục vít có đường kính  $D = 7,9 mm$  là phù hợp.

Để tính chiều dài của trục vít, ta chọn một tỷ số  $L/D$  phổ biến là 12/1 [29].

Lúc này chiều dài của trục vít là:

$$L = 12 \times D = 12 \times 7,9 = 98,4 (mm) \quad (27)$$

#### 3.2.2. Tính nhiệt cần cung cấp cho quá trình đùn

Xét tổng thể quá trình trao đổi nhiệt của thân máy đùn, ta được phương trình cân bằng nhiệt tổng quát trong quá trình đùn như sau [31, 32]:

$$Q_{ext} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_u \quad (28)$$

Trong đó,  $Q_{ext}$  là nhiệt lượng cần thiết cho quá trình đùn,  $Q_{cond}$  là lượng nhiệt thất thoát do dẫn nhiệt,  $Q_{conv}$  là lượng nhiệt mất đi do truyền nhiệt đối lưu,  $Q_{rad}$  là lượng nhiệt mất đi do bức xạ nhiệt,  $Q_u$  là lượng nhiệt cần thiết để nâng nhiệt độ nhựa từ nhiệt độ môi trường lên nhiệt độ đùn.

Sau đó, từng thành phần của **phương trình (28)** được phân tích. Lượng nhiệt thất thoát do dẫn nhiệt sang các linh kiện khác  $Q_{cond}$  được bỏ qua vì các linh kiện khác được sử dụng là nhựa.

Lượng nhiệt mất đi do truyền nhiệt đối lưu [31]:

$$Q_{conv} = h_c A (T - T_f) \quad (29)$$

$h_c$ : Hệ số truyền nhiệt đối lưu. Của đồng là khoảng 60-65 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> [31], ta chọn  $h_c = 60 W.m^{-2}.K^{-1}$ ;

## NGHIÊN CỨU DÒNG CHẢY CỦA NHỰA NÓNG CHẢY...

$A$ : Khu vực truyền nhiệt của bề mặt (phần bề mặt tiếp xúc với không khí), là  $0,008654 \text{ m}^2$ ;

$T$ : Nhiệt độ của bề mặt, là  $433,15 \text{ độ K}$ ; theo khảo sát từ các cơ sở in 3D và đùn sợi nhựa ABS, nhiệt độ in 3D của nhựa ABS là khoảng  $503,15 - 533,15 \text{ độ K}$  còn nhiệt độ đùn sợi nhựa thì trong khoảng  $393,15 - 433,15 \text{ độ K}$ . Do đó, nhiệt độ  $433,15 \text{ độ K}$  được chọn.

$T_f$ : Nhiệt độ không khí, là  $298,15 \text{ độ K}$ ;

Ta được  $Q_{conv} = 70,1 \text{ W}$ .

Lượng nhiệt mất đi do bức xạ nhiệt [31]:

$$Q_{rad} = \sigma \epsilon A (T_2^4 - T_1^4) \quad (30)$$

$\sigma$ : Hằng số Stephan-Boltzman, là  $5,670373 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ;

$\epsilon$ : Độ phát xạ, của đồng bị nung nóng, là  $0,78$  [31];

$T_2$ : Nhiệt độ của bề mặt, là  $433,15 \text{ độ K}$ ;

$T_1$ : Nhiệt độ không khí, là  $298,15 \text{ độ K}$ ;

$A$ : Khu vực truyền nhiệt của bề mặt (phần bề mặt tiếp xúc với không khí), là  $0,008654 \text{ m}^2$ .

Ta được:  $Q_{rad} = 1,7 \text{ W}$ .

Lượng nhiệt cần thiết để nâng nhiệt độ nhựa từ nhiệt độ môi trường lên nhiệt độ đùn [31]:

$$Q_u = m C_p \Delta T \quad (31)$$

$m$ : Khối lượng dòng chảy;

$\rho$ : Khối lượng riêng của nhựa ABS, là  $1050 \text{ kg/m}^3$  [31];

$v$ : tốc độ đùn nhựa  $200 \text{ mm/phút} \sim 0,0033 \text{ m/s}$ ;

$C_p$ : Nhiệt dung riêng của nhựa là  $0,0016 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ .

$$m = \rho v F = 8,316 \times 10^{-6} (\text{kg/s}) \quad (32)$$

Thay (32) vào (31), ta được:  $Q_u = 1,8 \times 10^{-3} \text{ W}$ .

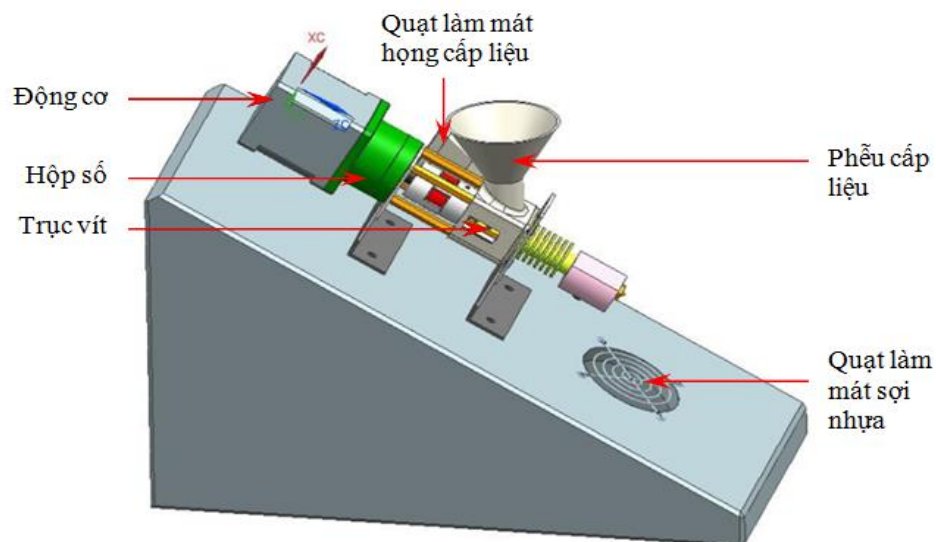
Như vậy, lượng nhiệt cần thiết cho quá trình đùn là, theo **phương trình (28)**:

$$Q_{ext} = 0 + 70,1 + 1,7 + 1,8 \times 10^{-3} = 71,8 (\text{W}) \quad (33)$$

Chọn nhiệt điện trở của máy có công suất  $90 \text{ W}$  để đảm bảo khả năng gia nhiệt cho thiết bị.

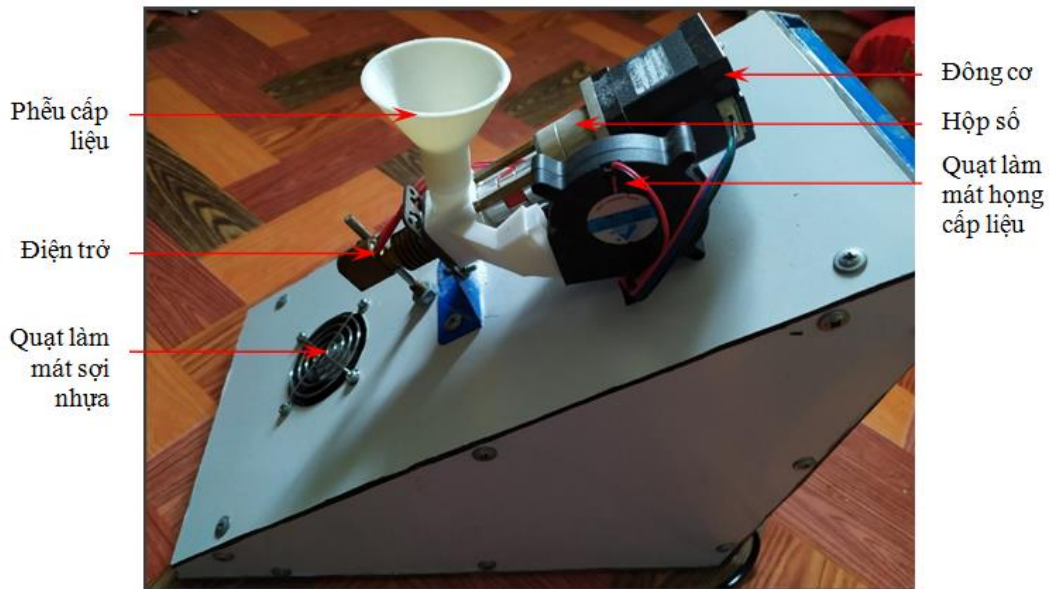
### 3.3. Chế tạo mô hình thiết bị đùn và kết quả thử nghiệm

Thiết bị đã được thiết kế bằng phần mềm NX Siemens. Trục vít được đặt nghiêng  $45^\circ$  so với phương ngang nhằm vừa tận dụng trọng lực trong quá trình đùn, vừa đảm bảo quá trình cấp liệu được thuận lợi. Đồng thời, họng cấp liệu được làm mát bằng một cái quạt máy tính. Việc làm mát này đảm bảo hạt nhựa không bị vón cục làm nghẹt họng cấp liệu. Sợi nhựa đùn ra được làm mát bằng một cái quạt máy tính đặt trước đầu đùn. **Hình 4** minh họa mô hình 3D của thiết bị đùn sợi nhựa này. Riêng bộ phận cấp liệu được in bằng máy in 3D FDM.



Hình 4: Mô hình 3D của máy đùn sợi nhựa

Thiết bị đã được chế tạo thành công và được đưa vào thử nghiệm, **hình 5**. Các kết quả thử nghiệm ban đầu cho thấy nhiệt độ đầu đùn là yếu tố quan trọng nhất cần phải được tinh chỉnh để tránh hiện tượng quá nhiệt. Khi bị quá nhiệt, sợi nhựa đùn ra còn có hiện tượng bị giòn và bị trong. Đường kính sợi nhựa đạt yêu cầu về kích thước và ổn định ở giá trị  $1,74 \pm 0,01$  mm. Sợi nhựa đùn được so sánh với sợi nhựa thương mại Torwell trong **hình 6**. Kết quả ngoại quan cho thấy không có sự khác biệt rõ ràng giữa hai loại sợi nhựa này.



Hình 5: Thiết bị nhiệt định hình được chế tạo thực tế.



Hình 6: So sánh sợi nhựa thương mại Torwell và sợi nhựa đùn

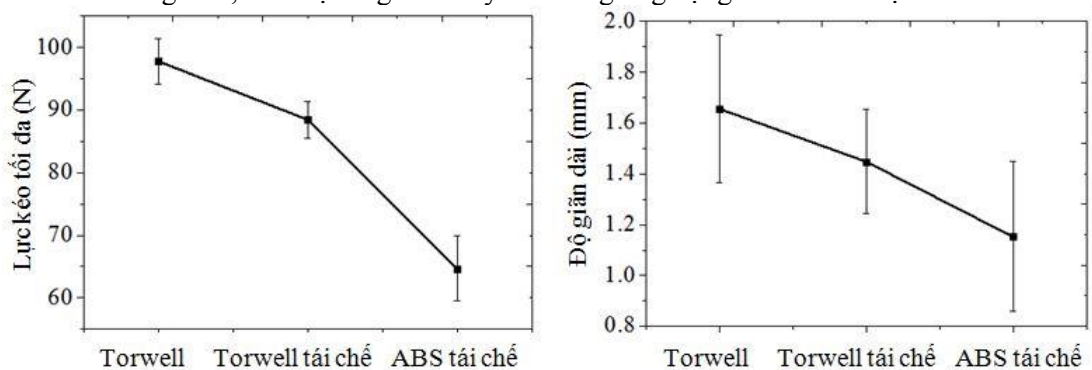
Một nghiên cứu về chất lượng sợi nhựa đã được thực hiện với máy thử độ bền kéo HP-500, lực kéo tối đa 500 N, độ chính xác 0,1 N như trong **hình 7**. Khoảng cách giữa hai ngàm kẹp của máy là 35 mm, độ dài mỗi mẫu trong khoảng 65-70 mm. Có ba loại sợi nhựa đã được thử nghiệm gồm sợi nhựa ABS thương mại Torwell®, nhựa ABS Torwell® tái chế và nhựa ABS tái chế từ nhựa công nghiệp trong nhà máy ép nhựa không rõ thương hiệu.



Hình 7: Thiết bị thử kéo HP-500.

Kết quả được trình bày trong **hình 8**. Trong đó, cả lực kéo tối đa và độ giãn dài đều giảm khi nhựa được tái chế, đây là do tính chất của nhựa. Độ biến thiên của nhựa tái chế không quá chênh lệch so với nhựa thương mại cho thấy chất lượng của quá trình đùn có sự ổn định cần thiết. Sợi nhựa được đùn ra đã được in thử bằng máy in tại Khoa Công nghệ Cơ khí, trường Đại học Công nghiệp Tp. HCM như được minh họa trong **hình 9**. Các điều kiện trước và trong quá trình in 3D dùng sợi nhựa đùn tương tự như khi dùng sợi nhựa thương mại [33]. Kết quả quan sát cho thấy, mẫu in từ sợi nhựa được đùn ra có chất lượng tương đương với sợi nhựa ABS thương mại. Do đó, thiết bị có thể được sử dụng để đùn sợi nhựa phục vụ cho giảng dạy và học tập tại trường.

Cũng cần lưu ý, trong **hình 8**, có kết quả thử kéo của nhựa ABS tái chế không rõ thương hiệu. Các kết quả này không thể so sánh trực tiếp độ lớn với kết quả từ sợi nhựa Torwell. Tuy nhiên, độ biến thiên của kết quả đo không quá chênh lệch với độ biến thiên từ nhựa nguyên Torwell. Điều này cho thấy độ ổn định của quá trình đùn. Đồng thời, thiết bị cũng cho thấy khả năng ứng dụng để tái chế nhựa cho in 3D.



Hình 8: Kết quả thử nghiệm độ bền kéo



Hình 9: Mẫu in 3D bằng sợi nhựa đùn từ nghiên cứu này.

Hiện nay, sợi nhựa được đùn ra được làm mát bằng quạt máy tính và được thả xuống theo trọng lực. Chính sự bất định của lực đỡ làm ảnh hưởng tới đường kính của sợi nhựa. Các nghiên cứu trước đây cho thấy, lực kéo sợi nhựa có ảnh hưởng rất lớn tới đường kính của nó [24-26]. Do đó, một cơ cấu cuộn sợi nhựa tương ứng với thiết bị sẽ được nghiên cứu trong tương lai.

#### 4. KẾT LUẬN

Dòng chảy của nhựa nóng chảy trong thiết bị đùn nhựa trục vít đơn có đặc tính tương tự như dòng chảy của chất lỏng nhớt giữa hai tấm song song vô hạn, một tấm chuyển động và một tấm cố định. Để các phương trình tính toán đơn giản và có thể áp dụng được trong thực tiễn sản xuất cũng như cho giảng dạy đại học, nhựa nóng chảy được giả thiết là một lưu chất Newton, một phương trình vi phân diễn tả mối quan hệ giữa tốc độ đùn và áp suất tại đầu đùn với các thông số hình học của trục vít và nhựa đùn được thành lập. Từ đó, khi độ nhớt của chất lỏng không đổi trong thiết bị đùn và đùn đẳng nhiệt, ta tính được tổng lưu lượng của thiết bị đùn. Bỏ qua dòng rò, tổng lưu lượng này bằng dòng chảy kéo trừ đi dòng áp suất. Từ phương trình liên tục của máy đùn này, ta tính ngược lại được đường kính trục vít của thiết bị. Phương trình tính đường kính trục vít này được kiểm nghiệm thông qua quá trình thiết kế và chế tạo một thiết bị đùn sợi nhựa cho máy in 3D. Kết quả cho thấy, các phương trình này đủ đơn giản để áp dụng trong thực tiễn tính toán. Khác với các công thức tính đường kính trục vít trong một số giáo trình khuôn mẫu hiện nay, cần phải đo được  $\Delta P$ , là độ tăng áp suất dọc theo chiều dài trục vít (nếu các áp suất tĩnh tại miệng nạp liệu và đầu ra của khuôn đùn là như nhau,  $\Delta P$  tương đương với độ chênh áp dọc khuôn đùn), sử dụng công thức trong nghiên cứu này, chỉ cần các thông số vận tốc quay của trục vít và năng suất cần thiết của máy đùn để tính chọn đường kính trục vít. Sợi nhựa được đùn từ thiết bị này có đường kính ổn định, độ bền kéo ổn định và có khả năng ứng dụng để in vật mẫu cho giảng dạy và học tập.

Để hoàn thiện hơn nữa nghiên cứu này, các mô phỏng tính toán dùng lý thuyết dòng chảy phi Newton sẽ được thực hiện. Sau đó, một mô hình máy đùn đủ chính xác để có thể bỏ qua dòng rò với các thiết bị đo áp suất để đo dòng áp suất sẽ được chế tạo để làm thí nghiệm thực. Từ đó, có những kết luận chính xác hơn về các công thức tính toán lý thuyết Newton, phi Newton và độ chính xác của chúng so với thực tế thí nghiệm.

#### LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn quỹ nghiên cứu khoa học trường Đại học Công Nghiệp TP.HCM, Việt Nam đã tài trợ cho nghiên cứu này thông qua dự án nghiên cứu khoa học dành cho sinh viên, số 19.1CK03SV.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Li and F. Hsieh, "Modeling of flow in a single screw extruder," *Journal of Food Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 353-375, 1996.
- [2] J. F. Carley and R. A. Strub, "Basic Concepts of Extrusion," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 45, pp. 970-973, 1953.
- [3] R. M. Griffith, "Fully Developed Flow in Screw Extruders. Theoretical and Experimental Study," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 1, pp. 180-187, 1962.
- [4] D. J. Weeks and W. J. Allen, "Screw Extrusion of Plastics," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 4, pp. 380-400, 1962.
- [5] Y. Li and F. Hsieh, "New melt conveying models for a single screw extruder," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 17, pp. 299-324, 1994.
- [6] G. Campbell, C. Wang, D. Hunt, and E. Leipold, "Screw Design and Newtonian Fluid Flow," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 16, pp. 1436 - 1444, 1997.
- [7] J. F. Carley, R. S. Mallouk, and J. M. McKelvey, "Simplified Flow Theory for Screw Extruders," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 45, pp. 974-978, 1953.
- [8] C. Marschik, M. Dörner, W. Roland, J. Miethlinger, V. Schöppner, and G. Steinbichler, "Application of Network Analysis to Flow Systems with Alternating Wave Channels: Part A (Pressure Flows)," *Polymers*, vol. 11, 2019.
- [9] C. Marschik, W. Roland, M. Dörner, S. Schaufler, V. Schöppner, and G. Steinbichler, "Application of Network Analysis to Flow Systems with Alternating Wave Channels: Part B. (Superimposed Drag-Pressure Flows in Extrusion)," *Polymers*, vol. 12, 2020.
- [10] C. Rauwendaal, "Finite element studies of flow and temperature evolution in single screw extruders," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 33, pp. 390-396, 2004.
- [11] P. H. Squires, "Screw extrusion-flow patterns and recent theoretical developments," *Polymer Engineering & Science*, vol. 4, pp. 7-16, 1964.
- [12] R. T. Fenner and J. G. Williams, "Some Experiments on Polymer Melt Flow in Single Screw Extruders," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 13, pp. 65-74, 1971.
- [13] R. Brzoskowski, K. Kubota, K. Chung, J. L. White, F. C. Weissert, N. Nakajima, *et al.*, "Experimental and Theoretical Study of the Flow Characteristics of Rubber Compounds in an Extruder Screw," *International Polymer Processing*, vol. 1, pp. 130-136, 1987.
- [14] E. E. Acur and J. Vlachopoulos, "Numerical simulation of a single-screw plasticating extruder," *Polymer Engineering & Science*, vol. 22, pp. 1084-1094, 1982.
- [15] Y. Wang and C. C. Tsay, "Non-newtonian flow modeling in the mixing section of a single-screw extruder with flow analysis network method," *Polymer Engineering and Science*, vol. 36, pp. 643-650, 1996.
- [16] N. Kim, H. Kim, and J. Lee, "Numerical analysis of internal flow and mixing performance in polymer extruder I: Single screw element," *Korea Australia Rheology Journal*, vol. 18, pp. 143-151, 2006.
- [17] C. Marschik, W. Roland, B. Löw-Baselli, J. Miethlinger, and J. Kepler, "Modeling Three-Dimensional Non-Newtonian Flows in Single-Screw Extruders," *Engineering*, 2017.
- [18] K. Wilczyński, K. Buziak, K. J. Wilczyński, A. Lewandowski, and A. Nastaj, "Computer Modeling for Single-Screw Extrusion of Wood-Plastic Composites," *Polymers*, vol. 10, p. 295, 2018.
- [19] K. Wilczyński, A. Nastaj, A. Lewandowski, K. J. Wilczyński, and K. Buziak, "Fundamentals of Global Modeling for Polymer Extrusion," *Polymers*, vol. 11, 2019.
- [20] J. Vlachopoulos, "The Role of Rheology in Polymer Extrusion," *Materials Science*, 2012.
- [21] M. Hyvärinen, R. Jabeen, and T. Kärki, "The Modelling of Extrusion Processes for Polymers-A Review," *Polymers*, vol. 12, p. 1306, 2020.
- [22] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, "Introduction and Basic Principles," in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Eds., ed New York, NY: Springer New York, 2015, pp. 1-18.
- [23] H. Giang. (2018, 02/18). In *3D sẽ tạo cuộc cách mạng trong công nghệ sản xuất?* Available: <https://vov.vn/cong-nghe/in-3d-se-tao-cuoc-cach-mang-trong-cong-nghe-san-xuat-737577.vov>



- [24] K. S. Boparai and R. Singh, "Development of Rapid Tooling Using Fused Deposition Modeling," in *Additive Manufacturing of Emerging Materials*, B. AlMangour, Ed., ed Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 251-277.
- [25] Harimalairajan.K, Sadhananthan.S, and S. Murugan, "Development of Plastic Filament Extruder for 3D Printing," *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, vol. 4, pp. 32-35, 2016.
- [26] A. L. Woern, J. R. McCaslin, A. M. Pringle, and J. M. Pearce, "RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament," *HardwareX*, vol. 4, p. e00026, 2018.
- [27] M. I. Mohammed, D. Wilson, E. Gomez-Kervin, C. Vidler, L. Rosson, and J. Long, "The recycling of E-Waste ABS plastics by melt extrusion and 3 D printing using solar powered devices as a transformative tool for humanitarian aid," *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International*, pp. 80-92, 2018.
- [28] S. Whyman, K. M. Arif, and J. Potgieter, "Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 3417-3428, 2018.
- [29] H. F. Giles, J. R. Wagner, and E. M. Mount, "5 - Screw Design," in *Extrusion*, H. F. Giles, J. R. Wagner, and E. M. Mount, Eds., ed Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2005, pp. 53-63.
- [30] J. M. Dealy and K. F. Wissbrun, "Role of Rheology in Extrusion," in *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing: Theory and Applications*, J. M. Dealy and K. F. Wissbrun, Eds., ed Dordrecht: Springer Netherlands, 1999, pp. 441-490.
- [31] J. Lienhard, *A Heat Transfer Textbook*: Phlogiston Press, Cambridge, 2013.
- [32] T. K. Nguyen and B.-K. Lee, "Post-processing of FDM parts to improve surface and thermal properties," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 24, pp. 1091-1100, 2018.
- [33] T. T. Huynh, T. V. T. Nguyen, Q. M. Nguyen, and T. K. Nguyen, "Minimizing Warpage for Macro-Size Fused Deposition Modeling Parts," *Computers, Materials & Continua*, vol. 68, 2021.

## INVESTIGATION OF FLOW THEORY FOR POLYMER MELT IN A SINGLE SCREW EXTRUDER

TRIEU KHOA NGUYEN\*, THANH QUY NGUYEN, ANH THUONG DOAN NGOC, MINH HUNG NGUYEN, NHU KIEN LAI, TUAN DONG MAI

*Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City*

*\*Corresponding: nguyengkhoatrieu@iuh.edu.vn*

**Abstract.** This paper presents a study on the flow of molten plastic in a single screw plastic extrusion device. The flow characteristic of molten plastic in a single screw plastic extruder is similar to that of a viscous liquid between two infinitely parallel plates, one moving and the other fixed. Assuming that the molten plastic was a Newtonian fluid, a differential equation describing the relationship between the extrusion speed, the pressure at the head of the extruder, and the screw geometry, the properties of the molten plastic was established. Hence, the integrated flow equation is derived in the case of isothermal extrusion and the fluid viscosity was constant inside the extruder. These flow behavior theories were then utilized to established an equation for screw diameter calculation and verified through the design and construction of a filament extrusion device for a 3D printer.

**Keywords.** Single screw extruder, flow behavior, Newtonian fluid, filament extruder, 3D printer.

*Ngày nhận bài: 30/03/2021*

*Ngày chấp nhận đăng: 30/06/2021*