

VỀ MỘT CẤU TRÚC MỚI CỦA CẢM BIẾN GIA TỐC ÁP ĐIỆN TRỞ BA BẬC TỰ DO NHẪM NÂNG CAO ĐỘ NHẠY

Trần Đức Tân

Trường Đại học Công Nghệ, ĐHQGHN

(Bài nhận ngày 25 tháng 01 năm 2010, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 17 tháng 05 năm 2010)

TÓM TẮT: Hiện nay công nghệ Vi cơ điện tử và Vi hệ thống (MEMS) đã có những bước phát triển vượt bậc. Cảm biến gia tốc là một trong những loại cảm biến MEMS thông dụng nhất bởi được sử dụng trong rất nhiều các ứng dụng khác nhau. Để chế tạo thành công một linh kiện MEMS thì quy trình thiết kế mô phỏng là rất quan trọng. Bài báo này trình bày về một thiết kế mới của cảm biến gia tốc ba bậc tự do kiểu áp trở nhằm nâng cao độ nhạy, độ phân giải - một yêu cầu luôn bức thiết của thực tế. Phần mềm ANSYS đã được sử dụng để thiết kế, mô phỏng và đánh giá được những ưu điểm của cấu trúc mới này so với các cảm biến được chế tạo trước đó.

Từ khóa: công nghệ Vi cơ điện tử, Vi hệ thống, cảm biến MEMS, Phần mềm ANSYS

1. GIỚI THIỆU

Các cảm biến gia tốc được chế tạo dựa trên công nghệ vi cơ điện tử và vi hệ thống đã và đang thâm nhập một cách mạnh mẽ trong hầu hết các lĩnh vực như y sinh [1, 2], công nghiệp ô tô, điện tử dân dụng, khoa học không gian... Hiện nay, về cơ bản có ba loại cảm biến gia tốc, đó là cảm biến gia tốc kiểu tụ [3, 4], áp điện và áp điện trở. Nhìn chung, cả ba loại cảm biến này đều có các ưu và nhược điểm riêng nhưng cảm biến gia tốc kiểu áp trở là thông dụng nhất bởi các ưu điểm vượt trội như độ nhạy cao, giá thành rẻ, mạch xử lý tín hiệu đơn giản [5] ... Với các ứng dụng ngày càng trở nên tinh tế như định vị và dẫn đường cho các vật thể bay thì yêu cầu về cảm biến gia tốc độ nhạy cao, kích thước nhỏ đang được đặt ra.

Hiện nay, việc thiết kế chế tạo các cảm biến gia tốc nhiều bậc tự do đã đạt được những thành công nhất định [5, 6]. Tuy nhiên, một yêu cầu thực tiễn luôn đòi hỏi đó là phải luôn tìm tòi ra các nguyên lý mới, cấu trúc mới có thể nâng cao phẩm chất của các cảm biến gia tốc này. Một yêu cầu nữa với các cảm biến gia tốc đó là kích thước phải nhỏ và đo được gia tốc theo nhiều chiều. Bài báo này trình bày về một cấu trúc cảm biến mới đáp ứng được các tiêu chí nói trên. Việc chế tạo cảm biến được đang được tiến hành và các kết quả đo chuẩn sẽ khẳng định rõ ràng hơn ưu điểm của các thiết kế này [10]. Cảm biến có kích thước nhỏ cỡ $1.0 \times 1.0 \times 0.45 \text{ mm}^3$, chế tạo dựa trên cơ sở công nghệ vi cơ khối sử dụng phiên SOI, hướng tới các ứng dụng đo gia tốc của các khối dẫn đường quán tính.

2. NGUYÊN TẮC HOẠT ĐỘNG

Hiện tượng thay đổi điện trở của vật liệu tinh thể dưới tác dụng của ứng suất cơ được gọi là hiệu ứng áp điện trở [6, 7]. Nguyên nhân đó là đặc tính dị hướng của độ phân giải mức năng lượng trong không gian tinh thể. Trong silic chỉ tồn tại ba hệ số áp điện trở không phụ thuộc vào nhau là π_{11} (liên hệ dọc), π_{12} (liên hệ ngang) và π_{44} (cho liên hệ trượt). Đối với silic đơn tinh thể có mật độ tạp dẫn thấp thì có thể coi những hệ số áp điện trở π_{11} , π_{12} và

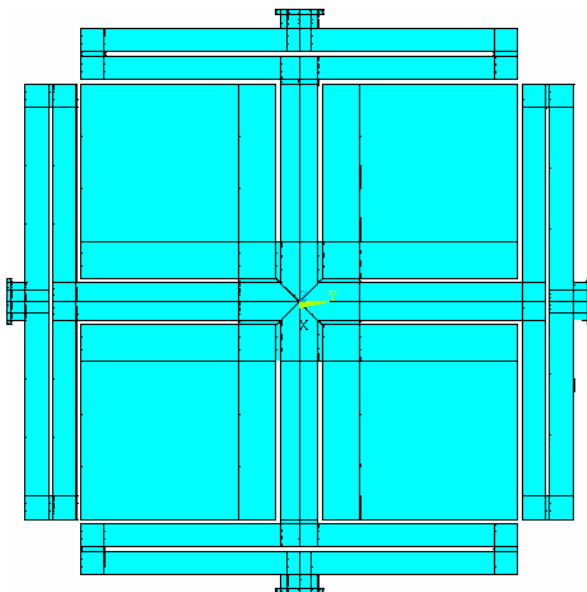
π_{44} là các hằng số. Người ta ứng dụng vật liệu biến dạng cơ là màng mỏng hay cấu trúc thanh dầm. Để đạt được độ dẫn ngang (chiều dài và chiều rộng) lớn thì cần chiều dày nhỏ và do vậy có thể bỏ qua ứng suất dọc. Lúc này, phần tử áp điện trở được cấy trên vật biến dạng cơ và mạch điện xử lý bên ngoài được thiết kế một cách thích ứng.

Trong các cảm biến gia tốc áp điện trở thì độ dịch chuyển của khối gia trọng sẽ làm thanh dầm biến dạng. Điện trở được cấy trên các thanh dầm sẽ biến đổi tỷ lệ thuận với gia tốc tác dụng lên khối gia trọng. Các cảm biến loại này thường được chế tạo theo công nghệ vi cơ khối 2 mặt. Cấu trúc thanh dầm và khối gia trọng sẽ được tạo hình bằng ăn mòn nhiều bước. Việc cấy tạp chất nồng độ cao sẽ tạo ra áp điện trở trên cấu trúc thanh dầm treo vật nặng.

Yêu cầu khắt khe đối với các cảm biến gia tốc ba bậc tự do là độ tuyến tính lớn và ảnh hưởng giữa các mode hoạt động (hay còn gọi là độ nhạy pháp tuyến) phải nhỏ. Mặt khác, cảm

biến phải đáp ứng được yêu cầu về độ nhạy cao theo các hướng cần đo. Để thỏa mãn các tiêu chí trên, trong công trình này một cấu trúc có

kích thước là $0.9 \times 0.9 \times 0.5 \text{ mm}^3$ (Hình 1) bao gồm một khối gia trọng được treo bởi hệ thống dầm đặc biệt đã được đề xuất.



Hình 1. Cấu trúc cảm biến gia tốc 3 chiều

Ví dụ khi cảm biến chịu tác dụng của gia tốc tịnh tiến theo phương Z thì khối gia trọng sẽ chuyển động lên hoặc xuống. Độ lệch của thanh dầm khi chịu tác dụng của gia tốc sẽ gây nên ứng suất tuyến tính.

Các áp điện trở trong thiết kế là các áp điện trở loại p được cấy trên bề mặt của các thanh dầm, có điện trở thay đổi khi sức căng xuất hiện do gia tốc tịnh tiến hoặc gia tốc quay. Sự thay đổi điện trở sẽ được biến đổi thành tín hiệu điện nhờ sử dụng mạch cầu Wheatston. Trong thiết kế này, 8 áp điện trở loại p được cấy trên 4 thanh dầm theo các hướng tinh thể $\langle 110 \rangle$ và $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ của silíc (100) nhờ quá trình khuếch tán.

Bảng 1. Thông số hình học của cảm biến

Thông số	Kích thước
Khe hở không khí	$5 \mu\text{m}$
Dầm bên trong	$455 \times 40 \times 3 \mu\text{m}^3$
Dầm bên ngoài	$25 \times 3 \mu\text{m}^2$ (W×T)
Bề rộng khung ngoài	$150 \mu\text{m}$
Kích thước chip	$0.9 \times 0.9 \times 0.5 \text{ mm}^3$

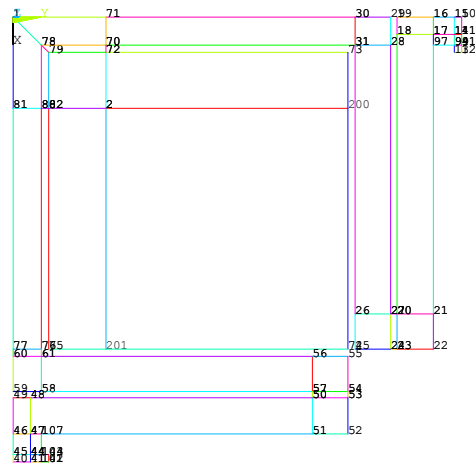
3. THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG

Các thông số hình học của cảm biến gia tốc sẽ quyết định tới hai thông số quan trọng là độ nhạy cơ học và tần số dao động tự nhiên. Hiện tại, có hai phương pháp chính để thiết kế và mô phỏng các cảm biến vi cơ điện tử là phương pháp phần tử nút (SUGAR) và phương pháp phần tử hữu hạn (ANSYS). Trong bài báo này, chúng tôi thực hiện mô phỏng bằng chương trình ANSYS [8] thông qua hình thức lập trình.

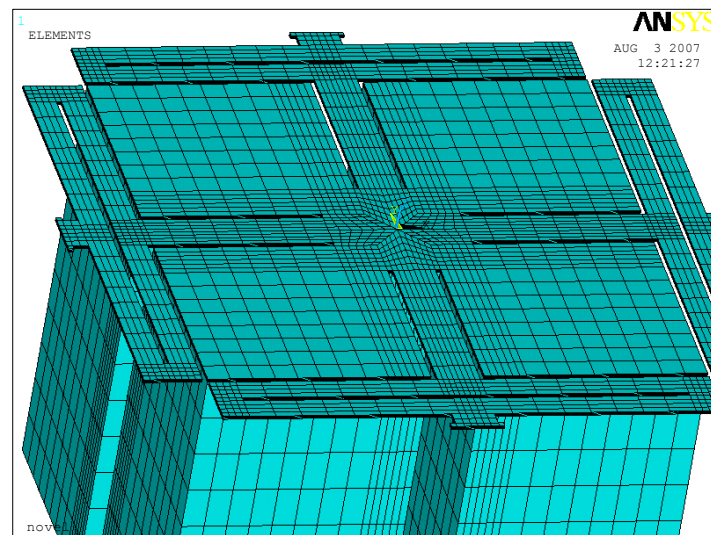
Để xây dựng được một cấu trúc cảm biến, người thiết kế có thể sử dụng tận dụng các phần mềm hỗ trợ vẽ 3 chiều (3D CAD) rồi đưa vào ANSYS để phân tích. Tuy nhiên, để có thể hoàn toàn làm chủ được bài toán thì phương án tốt nhất là xây dựng cấu trúc cảm biến ngay từ trong ANSYS. Để đảm bảo độ chính xác của mô phỏng thì việc xây dựng cấu trúc cũng là một quy trình rất tinh tế. Để nhận thấy là cấu trúc cảm biến là đối xứng nên chúng ta có thể xây dựng toàn bộ cấu trúc từ $\frac{1}{4}$ thành phần (Hình 2). Việc chia nhỏ như Hình 2 là công việc cần thiết cho quy trình chia lưới sau này. Mô hình phần tử hữu hạn (FEM) của cảm biến được chia lưới dày đặc (Hình 3) trên các thanh

dầm nhằm xác định chính xác phân bố ứng suất trên các thanh dầm. Điều này có ý nghĩa rất lớn vì sẽ quyết định tới vị trí cấy các áp điện trở sao cho tín hiệu đưa ra là lớn nhất. Một lưu ý

cũng rất quan trọng nữa là vị trí cấy các áp điện trở phải đảm bảo cho các gia tốc pháp tuyến là nhỏ nhất.



Hình 2. Xây dựng cấu trúc từ 1/4 thành phần



Hình 3. Chia lưới 3 chiều kiểu phần tử vuông

Có nhiều phương pháp để xác định các mode dao động và trong thiết kế này, người thiết kế sử dụng thuật toán Block_Lanczos. Các tần số cộng hưởng của 3 mode dao động theo các trục X, Y và Z được liệt kê trong Bảng 2.

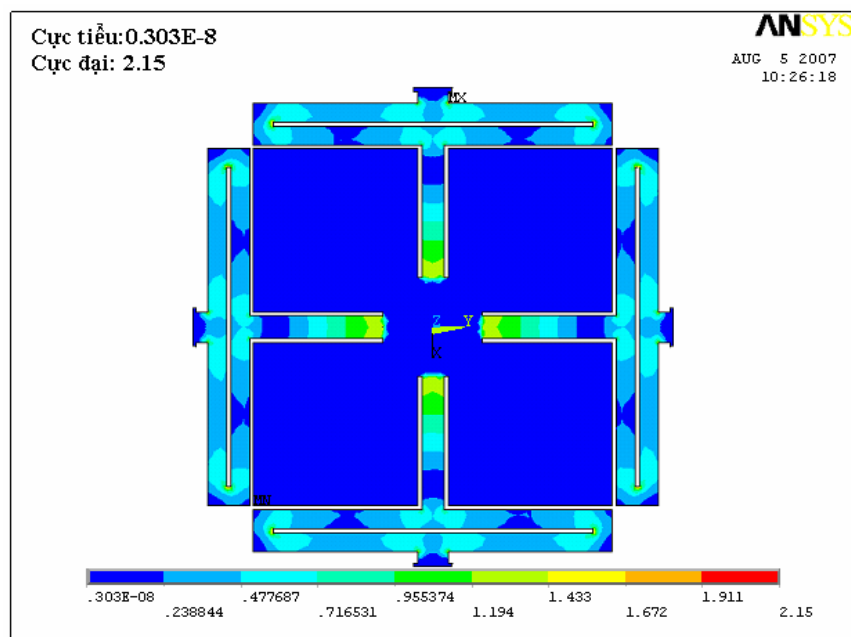
Bảng 2. Các mode hoạt động của cảm biến

Mode	Tần số (Hz)
1 (trục X)	1205
2 (trục Y)	1203
3 (trục Z)	1705

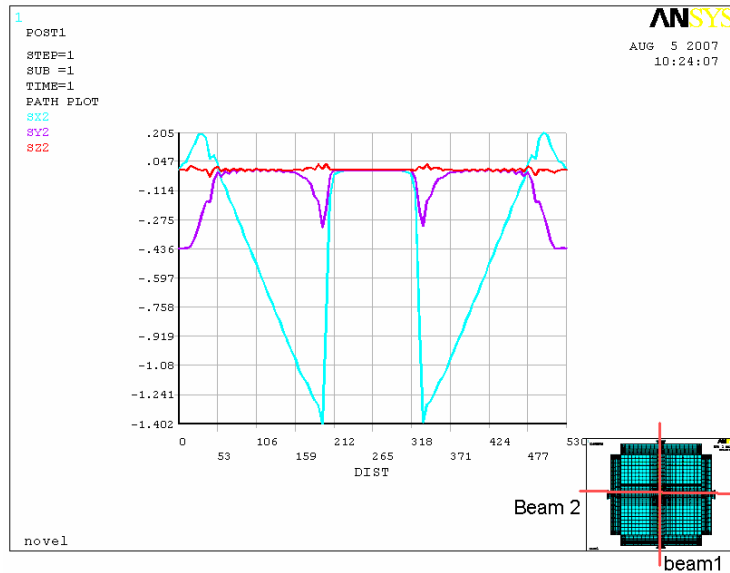
Hình 4 là phân bố ứng suất trên các thanh dầm khi chịu tác dụng bởi gia tốc AZ và Hình 5 là kết quả chi tiết phân bố ứng suất dọc theo thanh dầm thứ 1. Kết quả tương tự cũng thu được khi phân tích ứng suất trên thanh dầm 2. Nhận xét rằng ứng suất dọc theo thanh dầm đóng vai trò quyết định so với các ứng suất pháp tuyến và ứng suất trượt. Từ kết quả như trong Hình 4 đã trình bày, nhận thấy rằng các

ứng suất σ_2 và σ_3 là rất nhỏ so với σ_1 . Hiện tượng này có gây ảnh hưởng đôi chút tới độ nhạy của cảm biến. Cụ thể là cần tránh đặt các áp điện trở quá gần 2 đầu của thanh dầm. Vì thế, độ thay đổi tương đối của điện trở có thể được tính như sau [9]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{11}' \sigma_1 \quad (1)$$

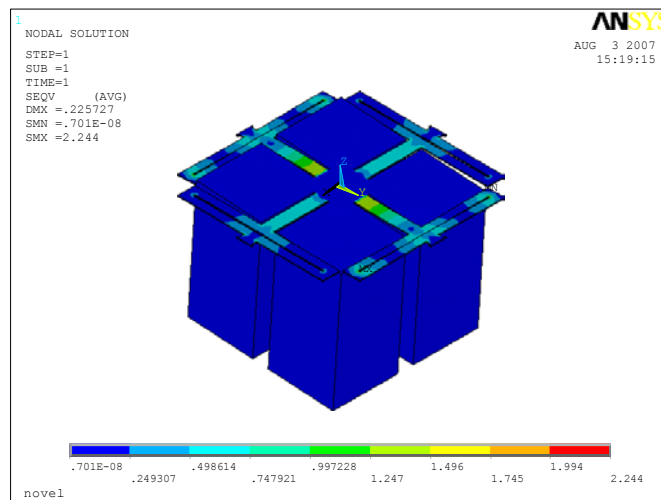


Hình 4. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm khi tác dụng gia tốc AZ

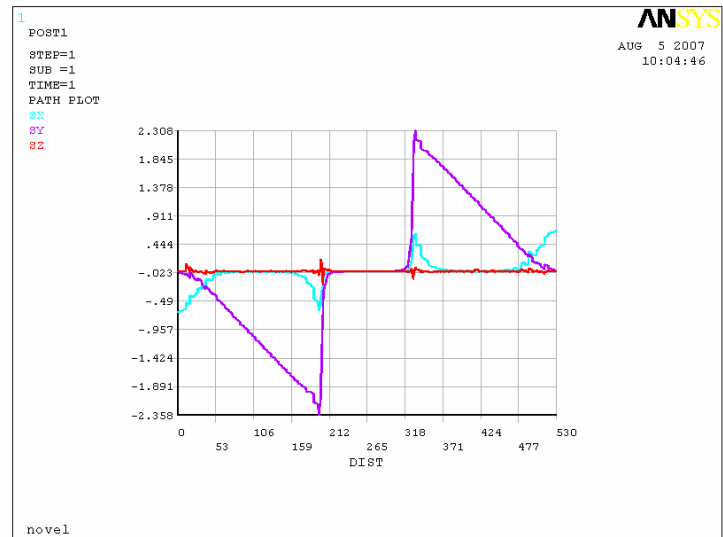


Hình 5. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm thứ 2 khi tác dụng gia tốc AZ

Thực hiện việc tác động gia tốc AY vào cấu trúc cũng thu được ứng suất trên các thanh dầm như trong hình 6 và kết quả phân bố ứng suất chi tiết dọc thanh dầm 1 trên Hình 7 (nơi phân bố ứng suất là lớn nhất). Quy trình tương tự cho thành phần gia tốc AX.



Hình 6. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm khi tác dụng gia tốc AY



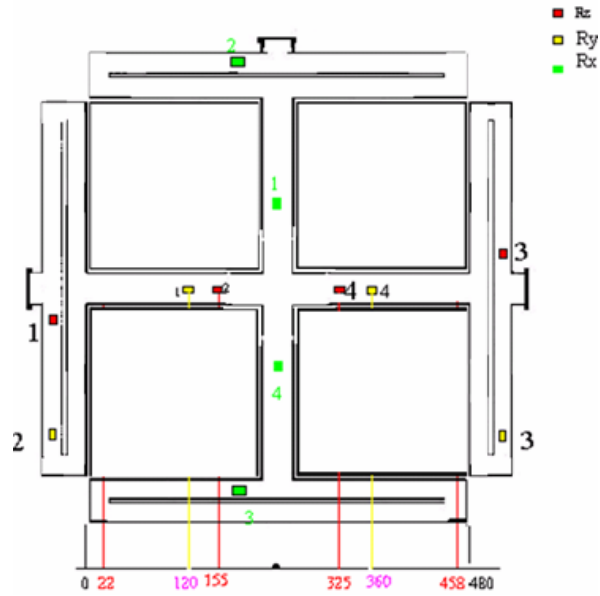
Hình 7. Phân bố ứng suất trên các thanh dầm thứ 1 khi tác dụng gia tốc AY

Sau khi xác định được phân bố ứng suất trên các thanh dầm, điều quan trọng tiếp theo đó là xác định vị trí đặt các áp điện trở sao cho khuếch đại tối đa tín hiệu mong muốn, đảm bảo tính đối xứng của mạch cầu và giảm thiểu tín

hiệu gia tốc pháp tuyến. Có thể xây dựng bảng thay đổi trở kháng ứng với các trường hợp các gia tốc tác dụng (xem Bảng 2). Kết quả từ bảng này được sử dụng trực tiếp cho tính toán vị trí đặt 8 áp điện trở trên 4 thanh dầm (Hình 8).

Bảng 3. Sự thay đổi giá trị của các áp điện trở khi tác dụng các gia tốc

	Ax		Ay		Az			
	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
Ax	-	+	0	0	0	-	0	+
Ay	0	0	-	+	0	0	0	0
Az	-	-	-	-	-	+	-	+



Hình 8. Đặt vị trí các áp điện trở

Các mạch cầu Wheaston được sử dụng để xác định sự thay đổi trở kháng của các áp điện trở trên các cảm biến. Hai mươi áp điện trở được nối với nhau để tạo thành sáu mạch cầu trên bốn thanh dẫn như mô tả trên Hình 8. Lưu ý là có hai loại mạch cầu khác nhau được sử dụng. R_{ref} ở đây là các điện trở cố định có giá trị bằng giá trị của các áp điện trở khi chưa chịu gia tốc tác dụng. Khi cảm biến hoạt động trong điều kiện lý tưởng, điện thế đầu ra bằng 0 và người ta gọi là cầu cân bằng. Khi ứng suất thay đổi, mạch cầu trở nên mất cân bằng và gây ra điện thế xác định ở lối ra. Các điện thế này

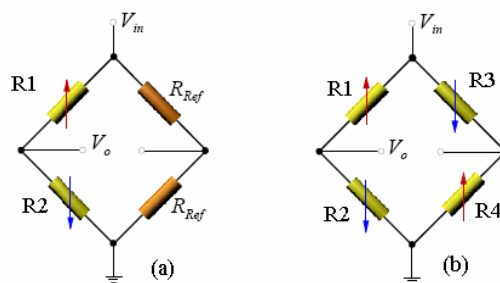
được xác định như sau, với mạch cầu loại (a) thì:

$$V = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) V_0 \quad (2)$$

Ở đây V_0 là điện thế đầu vào, V là điện thế đầu ra, ΔR_i và R_i ($i=1,2$) là sự thay đổi giá trị điện trở và giá trị điện trở mắc trên mạch cầu.

Còn với mạch cầu loại (b) thì:

$$V = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_0 \quad (3)$$



Hình 8. Hai loại mạch cầu Wheastone được sử dụng

Hình 7 là cách sắp xếp cụ thể các áp điện trở trên các thanh dầm ở các vị trí tối ưu nhất. Từ đó, xây dựng Bảng tính 3 cho phép xác định chính xác các đầu ra ứng với mỗi trường hợp gia tốc tịnh tiến hoặc gia tốc quay tác động vào cảm biến. Nhận xét rằng với cách bố trí tối ưu như vậy, các đầu ra có thể khuếch đại tối đa tín hiệu mong muốn và giảm triệt để các gia tốc pháp tuyến tác động lên cảm biến.

Việc đánh giá chất lượng của cảm biến được thực hiện với các điều kiện khi chế tạo

như sau: các áp điện trở có kích thước $20 \times 1.5 \times 0.4 \mu\text{m}^3$, hệ số áp điện trở theo chiều dọc $43 \times 10^{-5} \text{MPa}^{-1}$ điện trở $6.6 \text{k}\Omega$ thì cảm biến theo phương Z sẽ có độ nhạy 0.4mV/V/g và độ phân giải 0.5mg ($1 \text{g} = 9.8 \text{m/s}^2$).

Độ nhạy của cảm biến gia tốc 3 chiều được liệt kê trong Bảng 4. Các kết quả này khi so sánh với các kết quả trong [9, 10] với các điều kiện tương tự sẽ cho độ nhạy tốt hơn.

Bảng 4. Độ nhạy của cảm biến gia tốc

	Cấu hình đề xuất		Cấu hình đã chế tạo	
	Ax, Ay	Az	Ax, Ay	Az
Độ nhạy	0.28 mV/V/g	0.4 mV/V/g	30 $\mu\text{V/V/g}$	23 $\mu\text{V/V/g}$
Độ phân giải	0.72 mg	0.5 mg	0.03g	0.05g

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã thiết kế và mô phỏng thành công cảm biến gia tốc ba bậc tự do, kích thước nhỏ, độ nhạy cao. Hiệu ứng áp điện trở đã được ứng dụng để xác định các gia tốc tác động vào cảm biến. Ngôn ngữ lập trình ANSYS đóng vai

trò quyết định trong việc xây dựng cấu trúc cũng như vị trí cấy các áp điện trở. Dải hoạt động của cảm biến là $\pm 5\text{g}$ và dải tần hoạt động là 250 Hz. Bởi thế nên cảm biến sẽ rất thích hợp với các ứng dụng đặc biệt như dùng trong các khối đo dẫn đường quán tính.

DEVELOPMENT OF A NEW STRUCTURE OF 3-DOF PIEZORESISTIVE ACCELEROMETER TO ENHANCE THE SENSITIVITY

Tran Duc Tan

Hanoi University of Engineering and Technology

ABSTRACT: Nowadays, the Micro Electro Mechanical System (MEMS) technology has been achieved great developments. Accelerometer is one kind of the most popular MEMS sensors due to it's widely applications. In order to fabricate any MEMS device, the design and simulation have been considered seriously. This paper presents a new design of the three degrees of freedom piezoresistive accelerometer to improve the sensitivity, urgent demand from the reality. The ANSYS software was utilized to design, simulate and evaluate the advantages of this new structure compared to other sensors fabricated previously.

Keywords: the Micro Electro Mechanical System, ANSYS software, Accelerometer

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J.C.Lotters, J.Schipper, P.H.Veltink, W.Olthuis, P.Bergveld, *Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers*

in medical applications, Sensors and Actuators A68, pp. 221-228, (1998).

- [2]. L. C. Spangler, C.J. Kemp, *Integrated silicon automotive accelerometer*, Sens. Actuators, A54, pp. 523-529, (1996).

- [3]. Tran Duc Tan, Nguyen Thang Long, Nguyen Phu Thuy, *Mechanical and Electronic Design of Capacitive Accelerometers*, ICMT2005, Malaysia, (2005).
- [4]. F.Rudolf, A.Jornod, J.Bergqvist, H.Leuthold, *Precision accelerometer with μg resolution*, Sens. Actuator A21/A23, pp. 297-302, (1996).
- [5]. Dzung Viet Dao, Toshiyuki Toriyama, John Wells and Susumu Sugiyama, *Silicon Piezoresistive Six-Degree of Freedom Force-Moment Micro Sensor*, Sensors and Materials, Vol. 15, No.3, pp. 113-135, (2003).
- [6]. C.S.Smith, *Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon*, Physical Rev. Vol.94, No.1, pp.42-49, (1962).
- [7]. Tufte, E.L. Stelzer, *Piezoresistive properties of silicon diffused layers*, J. Appl. Phys., vol.34, No.2, pp.313-318, (1962).
- [8]. www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys.
- [9]. Ranjith Amarasinghe, Dzung Viet Dao, Toshiyuki Toriyama and Susumu Sugiyama, *A Silicon Micromachined Six-Degree of Freedom Piezoresistive Accelerometer*, IEEE Sensors2004 The 3rd Int'l Conference on Sensors, Oct.24-27, (2004).
- [10]. Bui Thanh Tung, Dao Viet Dzung, Dau Thanh Van, Susumu Sugiyama, *Three Degree of Freedom Micro Accelerometer Depended on MEMS Technology: Fabrication and Application*, First International Workshop on Nanotechnology and Application IWNA, Vietnam, (2007).

TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU VỚI CHUẨN TỐI ƯU TỔ HỢP R ỨNG DỤNG XÁC LẬP CHẾ ĐỘ CÔNG NGHỆ SẤY THĂNG HOA (STH) TÔM BẠC

Nguyễn Tấn Dũng⁽¹⁾, Lê Xuân Hải⁽²⁾, Trịnh Văn Dũng⁽²⁾

(1) Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

(2) Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG – HCM

(Bài nhận ngày 07 tháng 01 năm 2010, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 29 tháng 05 năm 2010)

TÓM TẮT: Bài báo này trình bày những kết quả nghiên cứu xác lập chế độ công nghệ STH tôm bạc, bằng cách giải bài toán đa mục tiêu với chuẩn tối ưu tổ hợp R (hay gọi là phương pháp vùng cấm). Nghiên cứu thực nghiệm đã tiến hành để xây dựng các hàm mục tiêu mô tả sự ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ: nhiệt độ môi trường sấy, áp suất môi trường sấy, thời gian sấy đến quá trình STH. Bằng phương pháp vùng cấm đã xác lập chế độ công nghệ tối ưu cho quá trình STH: có chỉ phí năng lượng tạo ra 1 kg sản phẩm (SP), độ co rút thể tích, tổn thất vitamine C của SP là nhỏ nhất, độ ẩm vật liệu sấy (VLS) nhỏ nhất phải đạt yêu cầu $(2 \div 6)\%$ và khả năng hút nước và trương nở trở lại của SP là lớn nhất (có nghĩa khả năng không hút nước trở lại của SP là bé nhất).

Từ khóa: Tối ưu hóa đa mục tiêu, tối ưu hóa công nghệ sấy thăng hoa, sấy thăng hoa.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

STH là một kỹ thuật phức tạp, nó gồm 3 giai đoạn nối tiếp nhau, **giai đoạn 1:** là giai đoạn lạnh đông VLS, tối ưu hóa giai đoạn này đã được trình bày [1], **giai đoạn 2 và 3:** là giai đoạn STH và giai đoạn sấy chân không (SCK), đây là 2 giai đoạn quyết định để tạo ra sản phẩm. Bài toán đặt ra ở đây là: làm thế nào để xác lập chế độ công nghệ STH sao cho 1 kg SP tạo ra tiêu tốn chỉ phí năng lượng là nhỏ nhất và SP có chất lượng tốt nhất. Chất lượng SP STH tốt nhất khi nó thỏa tất cả các tiêu chí sau: độ co rút thể tích, tổn thất vitamine C của SP nhỏ nhất, khả năng hút nước hoàn nguyên trở lại của SP là lớn nhất, độ ẩm cuối cùng của SP phải đạt yêu cầu $(2 \div 6)\%$, [2].

Như vậy, trong quá trình nghiên cứu xác lập chế độ công nghệ STH cả 5 tiêu chí: y_1 , [kWh] - chỉ phí năng lượng/ 1 kg SP; y_2 , [%] - độ ẩm cuối cùng của SP; $y_3 = (1 - IR).100$, [%] - khả năng không hút nước trở lại của SP (trong đó: IR , [%] - khả năng hút nước trương nở trở lại của SP); y_4 , [%] - độ co rút SP sau khi sấy; y_5 , [%] - lượng tổn thất vitamine C của SP, phụ thuộc vào 3 yếu tố công nghệ: nhiệt độ môi trường sấy (Z_1 , [$^{\circ}C$]), áp suất môi trường sấy (Z_2 , [mmHg]), thời gian sấy (Z_3 , [h]) đều mong muốn đạt được kết quả tốt nhất. Vì vậy, đã xuất hiện sự đòi hỏi phải đặt ra và giải quyết một cách chuẩn mực bài toán tối ưu (BTTU) đa mục tiêu. Đây là BTTU thường xuyên xuất hiện trong thực tế và thuộc các lĩnh vực khác nhau. Bài báo này trình bày phương pháp giải

BTTU đa mục tiêu với chuẩn tối ưu tổ hợp R(Z) (hay gọi phương pháp vùng cấm), [4, 8]. Kết quả đó kết hợp với việc giải mô hình toán truyền nhiệt tách ẩm trong điều kiện STH [1,3] sẽ xác lập chế độ công nghệ STH của thực phẩm thủy sản nhóm giáp xác đại diện là tôm bạc.

2. TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU VỚI CHUẨN TỐI ƯU TỔ HỢP R

2.1. Một số khái niệm cơ sở [4, 8]

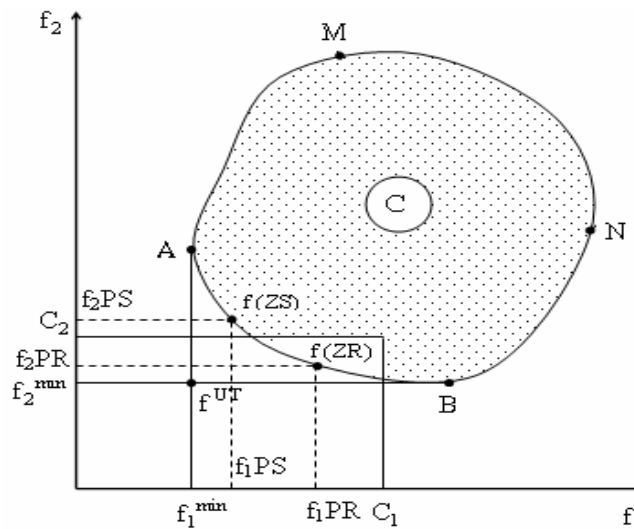
Xét một đối tượng công nghệ gồm m hàm mục tiêu $f_1(Z), f_2(Z), \dots, f_m(Z)$ tạo thành **véc tơ hàm mục tiêu** $f(Z) = \{f_j(Z)\} = \{f_1(Z), f_2(Z), \dots, f_m(Z)\}$, trong đó $j = 1 \div m$, mỗi hàm thành phần $f_j(Z)$ phụ thuộc vào n biến tác động $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$, các biến tác động Z_i ($i = 1 \div n$) sẽ hình thành véc tơ các yếu tố ảnh hưởng hay gọi là **véc tơ biến Z**. Các biến này biến thiên trong **miền giới hạn (miền xác định)** ΩZ và các giá trị của hàm mục tiêu sẽ tạo thành **miền giá trị của hàm mục tiêu** Ωf (miền nằm trong đường cong kín $A - f(ZS) - f(ZR) - B - N - M$, xem hình 1).

Mỗi hàm mục tiêu $f_j(Z)$ cùng với véc tơ biến $Z = \{Z_i\} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \in \Omega Z$ ($i = 1 \div n$) hình thành một BTTU một mục tiêu. Để đơn giản nhưng không hề làm mất tính tổng quát, thì BTTU m mục tiêu sẽ được trình bày cho trường hợp toàn bộ m BTTU một mục tiêu đều là các bài toán tìm cực tiểu có dạng.

$$f_j^{\min} = f_j(Z_1^{j \text{ opt}}, Z_2^{j \text{ opt}}, \dots, Z_n^{j \text{ opt}}) = \text{Min } f_j(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \quad (1)$$

$$Z = \{Z_i\} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \in \Omega Z \quad (2)$$

$$j = 1 \div m; i = 1 \div n \quad (3)$$



Hình 1. Không gian hàm mục tiêu của BTTU hai mục tiêu

2.2. Phương án không tương và hiệu quả không tương [4, 8]

Nếu tồn tại vectơ biến $Z^{UT} = \{Z_i^{UT}\} = (Z_1^{UT}, Z_2^{UT}, \dots, Z_n^{UT}) \in \Omega Z$ là nghiệm chung cho tất cả m BTTU một mục tiêu (1) + (2) + (3), nghĩa là $Z_i^{UT} = Z_i^{UT}$ với mọi $i = 1 \div n$, thì Z_i^{UT} được gọi là phương án không tương hoặc nghiệm không tương của BTTU m mục tiêu.

Trong thực tế thường không tồn tại Z_i^{UT} nhưng vì mỗi BTTU một mục tiêu (1) + (2) + (3) vẫn có các $f_j^{\min}$ (với $j = 1 \div m$) tương ứng nên vẫn tồn tại $f^{UT} = (f_1^{\min}, f_2^{\min}, \dots, f_m^{\min})$ và khi đó $f^{UT} = (f_1^{\min}, f_2^{\min}, \dots, f_m^{\min})$ được gọi là hiệu quả không tương hay điểm không tương. Ở hình 1 điểm không tương f^{UT} của BTTU hai mục tiêu tồn tại nhưng nằm ngoài miền xác định Ωf tức là nghiệm không tương không tồn tại.

2.3. Phương án trội và phương án bị trội [4, 8]

Giả sử xét hàm đa mục tiêu, có hai vectơ biến $ZQ = \{ZQ_i\}$ và $ZV = \{ZV_i\}$ với mọi $i = 1 \div n$, sẽ có hai vectơ hàm tương ứng $f(ZQ) = \{f_j(ZQ)\}$ và $f(ZV) = \{f_j(ZV)\}$ với mọi $j = 1 \div m$.

Nếu với mọi j đều có: $f_j(ZQ) < f_j(ZV)$ thì ZQ được gọi là **phương án trội** (hay **ng nghiệm trội**) so với ZV , ký hiệu: $ZQ > ZV$, còn ZV được gọi là **phương án bị trội** (hay **ng nghiệm bị trội**), ký hiệu: $ZV < ZQ$. Ngược lại, nếu với mọi j đều có: $f_j(ZQ) > f_j(ZV)$ thì ZV được gọi là **phương án trội** (hay **ng nghiệm trội**) so với ZQ , ký hiệu: $ZV > ZQ$, còn ZQ được gọi là **phương án bị trội** (hay **ng nghiệm bị trội**), ký hiệu: $ZQ < ZV$.

2.4. Phương án Paréto tối ưu [4, 8]

Phương án ZP được gọi là **phương án Paréto tối ưu** nếu ZP không thể bị trội bởi bất kỳ phương án nào khác thuộc miền giới hạn ΩZ . Khi đó $f(ZP)$ được gọi là một **hiệu quả Paréto tối ưu** nằm trong **tập hiệu quả Paréto tối ưu** ΩfP .

Ở hình 1 tập hiệu quả Paréto tối ưu ΩfP chính là đường cong $A - f(ZS) - f(ZR) - B$.

2.5. Định lý Paréto tối ưu [4, 8]

Định lý 1: Nếu BTTU đa mục tiêu có nghiệm được gọi là tối ưu theo một cách định nghĩa nào đó thì không phụ thuộc vào cách định nghĩa đã chọn, nghiệm tối ưu đó phải là một phương án Paréto tối ưu.

Thật vậy, nếu nghiệm tối ưu Z của BTTU' đa mục tiêu không phải là một phương án Pareto tối ưu thì chắc chắn có thể tìm được ít nhất một phương án trội hơn Z . Điều đó chứng tỏ rằng Z không thể được công nhận là nghiệm tối ưu và dẫn đến mâu thuẫn với giả thiết rằng Z đã là nghiệm tối ưu. Vậy Z phải là một phương án không thể bị trội, tức là phương án Pareto tối ưu.

Như vậy, theo định lý 1, một nghiệm của BTTU' đa mục tiêu (1) + (2) + (3) tìm được bằng một phương pháp giải bất kỳ nào đó, muốn được công nhận là tối ưu theo phương pháp giải đã lựa chọn, trước hết phải được chứng minh nghiệm đó phải là một phương án Pareto tối ưu.

2.6. Tối ưu hóa đa mục tiêu với chuẩn tối ưu tổ hợp R [4, 8]

Phương pháp sử dụng chuẩn tối ưu tổ hợp R gọi là phương pháp vùng cấm, khi BTTU' đa mục tiêu (1) + (2) + (3) không tồn tại nghiệm không tương, lúc đó đi tìm một điểm nằm trong tập hiệu quả Pareto tối ưu nằm gần điểm không tương mà cách xa vùng cấm nhất.

Trong thực tế nhiều BTTU' đa mục tiêu được đặt ra có các điều kiện ràng buộc đối với chính các giá trị của các hàm mục tiêu thành phần $f_j(Z)$, hay nói một cách khác điều kiện ràng buộc đó chính là miền giá trị của các hàm mục tiêu thành phần $f_j(Z)$ mà bài toán công nghệ quy định, khi Z biến thiên trong miền xác định ΩZ .

$$\text{Ký hiệu: } f_j(Z) < C_j, \forall j = 1 \div m \quad (4)$$

Thông thường, đối với bài toán tìm cực tiểu thì C_j là cận trên của hàm mục tiêu thành phần $f_j(Z)$, còn đối với bài toán tìm cực đại thì C_j là cận dưới của hàm mục tiêu thành phần $f_j(Z)$, khi giá trị hàm mục tiêu $f_j(Z)$ nằm ngoài miền giá trị thì gọi là vùng cấm.

Các điều kiện (4) tạo thành vùng cấm:

$$C = \{f_j(Z) < C_j\} \text{ đối với hàm mục tiêu } f_j(Z) \quad (5)$$

Phương pháp vùng cấm, đề xuất giải BTTU' m mục tiêu (1) + (2) + (3) với chuẩn tối ưu tổ hợp $R(Z)$ được định nghĩa theo biểu thức sau:

$$R(Z) = r_1(Z) \cdot r_2(Z) \cdot \dots \cdot r_m(Z) = \prod_{j=1}^m f_j(Z) \quad (6)$$

Trong đó:

$$r_j(Z) = \frac{C_j - f_j(Z)}{C_j - f_{j\min}} \quad \text{khi } f_j(Z) \leq C_j \quad (7)$$

$$r_j(Z) = 0 \quad \text{khi } f_j(Z) > C_j \quad (8)$$

Từ (7) có thể thấy rằng: khi $f_j(Z) \rightarrow f_{j\min}$ thì $r_j(Z) \rightarrow r_{j\max} = 1$. Vậy với chuẩn tối ưu tổ hợp $R(Z)$ thì BTTU' m mục tiêu được phát biểu lại:

Hãy tìm nghiệm $ZR = (Z_1R, Z_2R, \dots, Z_nR) \in \Omega Z$ sao cho hàm mục tiêu $R(Z)$ đạt giá trị cực đại nằm trong miền giá trị Ωf .

$$R_{\max} = R(ZR) = \max R(Z) = \max [r_1(Z) \cdot r_2(Z) \cdot \dots \cdot r_m(Z)] = \max \left[\prod_{j=1}^m f_j(Z) \right] \quad (9)$$

$$\text{Với: } Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \in \Omega Z$$

Dễ dàng thấy rằng: $0 \leq R(ZR) \leq 1$, trong đó $R(ZR) = 1$ khi nghiệm tối ưu chính là nghiệm không tương Z^{UT} và $R(ZR) = 0$ khi chỉ cần một trong các giá trị $f_j(Z)$ vi phạm bất đẳng thức (5), có nghĩa khi điểm $f(Z)$ rơi vào vùng cấm C (6).

BTTU' đa mục tiêu (9) đã đề xuất cho các bài toán công nghệ nhưng chưa chứng minh được rằng nghiệm ZR là một nghiệm Pareto tối ưu.

Định lý 2: Nghiệm ZR của BTTU' (9), nếu tồn tại thì nghiệm ZR chính là nghiệm Pareto tối ưu của BTTU' m mục tiêu (1) + (2) + (3).

Thật vậy, Giả sử ZR không phải là nghiệm Pareto tối ưu. Khi đó sẽ tìm được một nghiệm ZR^* bị trội hơn ZR . Theo định nghĩa, nghiệm ZR^* nhất định phải có ít nhất một hiệu quả $f_k(ZR^*)$, trong đó $1 \leq k \leq m$, sao cho $f_k(ZR^*) > f_k(ZR)$; $\forall \Omega Z$. Từ đó suy ra $R(ZR^*) > R(ZR)$ và $f_k(ZR^*)$ rơi vào vùng cấm. Điều này mâu thuẫn với giả thiết rằng ZR là nghiệm tối ưu. Vậy không thể tồn tại bất cứ nghiệm nào khác bị trội hơn ZR , do đó ZR phải là một nghiệm Pareto tối ưu.

Ký hiệu: $f(ZR) = fPR = (f_1PR, f_2PR, \dots, f_mPR)$. Với nghiệm tối ưu ZR , hiệu quả Pareto tối ưu $fPR = (f_1PR, f_2PR, \dots, f_mPR)$ đứng cách xa vùng cấm C nhất.

Một cách hoàn toàn tương đương có thể thay chuẩn tối ưu $R(Z)$ bằng chuẩn tối ưu $R^*(Z)$ như sau:

$$R^*(Z) = \sqrt[m]{r_1(Z) \cdot r_2(Z) \cdot \dots \cdot r_m(Z)} = \left[\prod_{j=1}^m f_j(Z) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

Trên **hình 1** cả hai hiệu quả Paréto tối ưu $f(ZS)$ và $f(ZR)$ đều thuộc tập hợp các hiệu quả Paréto tối ưu ΩfP (đường cong $A - f(ZS) - f(ZR) - B$) nhưng nghiệm Paréto tối ưu ZR cho hiệu quả Paréto tối ưu $f(ZR)$ nằm cách xa vùng cấm nhất. Trong khi đó nghiệm Paréto tối ưu ZS cho hiệu quả Paréto tối ưu $f(ZS)$ nằm gần điểm không tương f^{UT} nhất nhưng lại rơi vào vùng cấm.

3. TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH STH [8]

3.1. Nguyên liệu

Vật liệu ẩm là tôm bạc có kích cỡ đại đa số $(41 \div 50)$ con/1 pound, hệ số phân cỡ $K = 11$, [1]. Chăn ở nhiệt độ $70^\circ C$ trong khoảng thời gian $(15 \div 20)$ s, sau đó bóc vỏ, bỏ đầu.

3.2. Phương pháp nghiên cứu

- Xác định chi phí năng lượng làm ra 1 kg SP (y_1) bằng Watt meter, [kWh], [5].

- Xác định độ ẩm của SP (y_2) bằng cảm biến khối lượng, đo lường bằng máy tính, [5].

$$\text{Với: } y_2 = 100 - \frac{G_{bd}}{G_t} (100 - W_{bd}) \quad (11)$$

- Xác định khả năng không hút nước hoàn nguyên trở lại của SP (y_3) như sau: gọi IR [%]: là khả năng hút nước hoàn nguyên trở lại của SP, thì $y_3 = 100\% - IR$, [2].

$$\text{Với: } IR = \frac{G_1 - G_t}{G_{bd} - G_t} 100\% \quad (12)$$

$$y_3 = 100\% - \frac{G_1 - G_t}{G_{bd} - G_t} 100\% = \frac{G_{bd} - G_1}{G_{bd} - G_t} 100\% \quad (13)$$

Trong đó: G_{bd} [kg]: khối lượng VLS ban đầu, G_t [kg]: khối lượng VLS cuối cùng, G_1 [kg]: khối lượng VLS sau khi sấy ngâm vào nước ở nhiệt phòng $25^\circ C$ trong cho đến khi khối lượng không đổi (bão hòa ẩm), W_{bd} [%]: độ ẩm ban đầu của VLS.

SP hoàn nguyên tốt nhất khi lượng ẩm hút trở lại bằng lượng ẩm tách ra trong quá trình sấy, có nghĩa $G_1 = G_{bd}$ và $IR_{max} = 100\%$, $y_{2min} = 0$. Thực tế $y_2 > 0$.

- Xác định độ co thể tích (y_4) như sau: xác định thể tích VLS ban đầu (V_1) và sau khi sấy (V_2), bằng cách lấy dụng cụ đo thể tích cho dầu vào ở thể tích xác định, sau đó cho VLS vào sẽ xác định được thể tích, và hiệu thể tích sau và trước khi cho VLS vào chính là thể tích của VLS. Như vậy xác định được y_4 , [2]:

$$y_4 = \frac{V_1 - V_2}{V_1} 100\% = \frac{\Delta V}{V_1} 100\% \quad (14)$$

SP không nứt nẻ bề mặt, khi SP không bị co ngót, có nghĩa $y_{4min} = 0$. Thực tế $y_4 > 0$.

- Xác định lượng tổn thất vitamine C của SP sau khi sấy, bằng cách xác định hàm lượng vitamine C của SP trước (m_1 [mg%]) và sau (m_2 [mg%]) khi sấy theo phương pháp TCVN 4715 – 89. Như vậy lượng tổn thất vitamine C xác định bởi:

$$y_5 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100\% = \frac{\Delta m}{m_1} 100\% \quad (15)$$

SP đạt chất lượng tốt khi không có tổn thất vitamine C, có nghĩa $y_{5min} = 0$, thực tế $y_5 > 0$.

- Xác định nhiệt độ bằng cảm biến nhiệt độ (Temperature sensor) đo lường bằng máy tính.

- Xác định áp suất bằng cảm biến áp suất (Pressure sensor) đo lường bằng máy tính.

- Phương pháp qui hoạch thực nghiệm trực giao cấp hai.

- Xác lập và giải BTTU 5 mục tiêu bằng phương pháp điểm không tương.

3.3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận [8]

3.3.1. Xây dựng các hàm mục tiêu thành phần của bài toán đa mục tiêu

Quá trình STH tối ưu có: y_1 - chi phí năng lượng cho 1 kg SP nhỏ nhất, y_2 - độ ẩm VLS phải đạt yêu cầu $(2 \div 6)\%$, IR- khả năng hút nước hoàn nguyên trở lại của SP là lớn nhất, có nghĩa: $y_3 = (1 - IR).100$, [%] - khả năng không hút nước của SP là bé nhất, y_4 - độ co rút của SP bé nhất và y_5 - tổn thất vitamine C của SP bé nhất phụ thuộc vào các yếu tố: nhiệt độ môi trường sấy (Z_1), áp suất môi trường sấy (Z_2), thời gian sấy (Z_3). Phương pháp quy hoạch thực nghiệm như sau: xây dựng ma trận thực nghiệm trực giao cấp 2 với $k = 3$, $n_0 = 4$, tiến hành 18 thí nghiệm. Các biến x_1, x_2, x_3 là các biến mã hóa của Z_1, Z_2, Z_3 . Cánh tay đòn có giá trị $\alpha = 1.414$

Từ việc thiết lập và giải mô hình toán truyền nhiệt tách ẩm trong điều kiện STH để độ ẩm cuối cùng của sản phẩm đạt yêu cầu $(2 \div 6)\%$, [1, 3], đã xác định được các điều kiện thí nghiệm như sau, **xem bảng 1**.

Bảng 1. Các mức yếu tố ảnh hưởng

Yếu tố	Các mức					Khoảng biến thiên λ
	$-\alpha$ (-1.414)	Mức dưới, -1	Mức cơ sở, 0	Mức trên, +1	$+\alpha$ (1.414)	
Z_1 [°C]	20.102	23	30	37	39.898	7
Z_2 [mmHg]	0.008	0.094	0.3	0.507	0.592	0.2065
Z_3 [h]	11.172	12	14	16	16.828	2

Tiến hành thực nghiệm theo các mức yếu tố ảnh hưởng ở **bảng 1** để xác định 5 mục tiêu đã được đặt ra: y_1, y_2, y_3, y_4 và y_5 , kết quả nhận được ở **bảng 2**.

Bảng 2. Ma trận thực nghiệm phương án trực giao bậc 2, $k = 3, n_0 = 4$

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1^2-0.667$	$x_2^2-0.667$	$x_3^2-0.667$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
TYT 2^k	1	1	1	1	1	1	1	0.333	0.333	0.333	79.42	3.68	12.38	10.872	3.198
	2	1	-1	1	-1	-1	1	0.333	0.333	0.333	81.51	4.74	9.99	8.896	2.498
	3	1	1	-1	-1	1	-1	0.333	0.333	0.333	88.92	3.54	11.68	10.754	2.161
	4	1	-1	-1	1	-1	-1	0.333	0.333	0.333	84.34	5.02	7.58	8.525	1.219
	5	1	1	1	-1	-1	-1	0.333	0.333	0.333	66.42	5.41	10.61	10.441	2.581
	6	1	-1	1	-1	1	-1	0.333	0.333	0.333	65.23	5.71	7.16	8.584	2.229
	7	1	1	-1	-1	-1	1	0.333	0.333	0.333	65.89	5.39	9.97	8.397	1.584
	8	1	-1	-1	-1	1	1	0.333	0.333	0.333	63.97	5.89	5.84	6.187	1.198
$2k$	9	1	1.414	0	0	0	0	1.333	-0.667	-0.667	79.89	4.11	13.17	12.895	3.356
	10	1	-1.414	0	0	0	0	1.333	-0.667	-0.667	67.34	4.83	5.22	5.997	1.645
	11	1	0	1.414	0	0	0	-0.667	1.333	-0.667	68.05	4.87	8.61	11.598	2.587
	12	1	0	-1.414	0	0	0	-0.667	1.333	-0.667	73.28	3.98	7.39	8.143	2.387
	13	1	0	0	1.414	0	0	-0.667	-0.667	1.333	96.97	3.51	12.28	10.031	2.498
	14	1	0	0	-1.414	0	0	-0.667	-0.667	1.333	65.45	5.03	7.33	7.459	1.713
n_0	15	1	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	75.41	4.39	7.11	7.621	2.176
	16	1	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	73.34	4.19	7.15	8.109	2.089
	17	1	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	76.71	4.25	7.19	8.321	2.314
	18	1	0	0	0	0	0	-0.667	-0.667	-0.667	72.29	4.09	7.68	7.523	2.012

Sau khi xử lý số liệu thực nghiệm, tính toán các hệ số phương trình hồi quy, kiểm định sự có nghĩa của các hệ số phương trình hồi quy theo chuẩn Student, kiểm tra sự tương thích của

phương trình hồi quy với kết quả thực nghiệm theo chuẩn Fischer đã thu được các phương trình hồi quy:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3) = 74.691 + 1.945x_1 + 9.771x_3 - 2.308(x_2^2 - 2/3) + 2.991(x_3^2 - 2/3) \quad (16)$$

$$y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) = 4.591 - 0.363x_1 - 0.631x_3 - 0.218x_1x_3 + 0.27(x_1^2 - 2/3) + 0.247(x_2^2 - 2/3) + 0.169(x_3^2 - 2/3) \quad (17)$$

$$y_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) = 8.797 + 2.109x_1 + 0.566x_2 + 1.254x_3 + 0.801(x_1^2 - 2/3) + 1.108(x_3^2 - 2/3) \quad (18)$$

$$y_4 = f_4(x_1, x_2, x_3) = 8.909 + 1.502x_1 + 0.818x_2 + 0.756x_3 - 0.494x_2x_3 + 0.438(x_1^2 - 2/3) + 0.651(x_2^2 - 2/3) \quad (19)$$

$$y_5 = f_5(x_1, x_2, x_3) = 2.191 + 0.4x_1 + 0.386x_2 + 0.216x_3 - 0.153(x_3^2 - 2/3) \quad (20)$$

3.3.2. Giải các BTTU' một mục tiêu [4, 8]

Các BTTU' một mục tiêu là tìm: $y_{1min} = \min f_1(x_1, x_2, x_3)$; $y_{2min} = \min f_2(x_1, x_2, x_3) \in [2, 6]$; $y_{3min} = \min f_3(x_1, x_2, x_3)$; $y_{4min} = \min f_4(x_1, x_2, x_3)$; $y_{5min} = \min f_5(x_1, x_2, x_3)$, với miền giới hạn: $\Omega x = \{-1.414 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1.414\}$ được giải nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Excel – Solver. Kết quả tính toán xác định được các thông số tối ưu cho từng BTTU' một mục tiêu (16), (17), (18), (19) và (20) trong vùng giới hạn nghiên cứu thực nghiệm như sau:

$y_{1min} = 59.035$ với:

$$x_1^{1opt} = -1.414;$$

$$x_2^{1opt} = 1.414;$$

$$x_3^{1opt} = -1.414$$

$y_{2min} = 3.162 \in [2, 6]$ với:

$$x_1^{2opt} = 1.243;$$

$$x_2^{2opt} = -6.26E-08;$$

$$x_3^{2opt} = 1.414$$

$y_{3min} = 4.981$ với:

$$x_1^{3opt} = -1.316;$$

$$x_2^{3opt} = -1.414;$$

$$x_3^{3opt} = -0.566$$

$y_{4min} = 4.996$ với:

$$x_1^{4opt} = -1.376;$$

$$x_2^{4opt} = -1.165;$$

$$x_4^{4opt} = -1.412$$

$y_{5min} = 0.594$ với:

$$x_1^{5opt} = -1.398;$$

$$x_2^{5opt} = -1.414;$$

$$x_3^{5opt} = -1.387$$

Từ kết quả đó xác định được điểm không tương $y^{UT} = (y_{1min}, y_{2min}, y_{3min}, y_{4min}, y_{5min}) = (59.035, 3.162, 4.981, 4.996, 0.594)$. Rõ ràng từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm ở trên đã xác định được điểm không tương nhưng phương án không tương không tồn tại. Bởi vì:

không tồn tại nghiệm chung của hệ, $(x_1^{jopt}, x_2^{jopt}, x_3^{jopt}) \neq (x_1^{kopt}, x_2^{kopt}, x_3^{kopt}) \forall j, k = 1 \div 5, j \neq k$.

3.3.3. Giải BTTU' đa mục tiêu theo phương pháp vùng cấm [4, 8]

Quá trình STH với 5 mục tiêu đã đề ra được biểu diễn bởi 5 phương trình hồi quy (16), (17), (18), (19) và (20). Vì không thể có nghiệm chung để làm thỏa mãn tất cả các giá trị: $y_{1min}, y_{2min}, y_{3min}, y_{4min}, y_{5min}$, nên BTTU' được đặt ra là tìm nghiệm Pareto tối ưu để hiệu quả Pareto tối ưu $y_{PR} = (f_1PR, f_2PR, f_3PR, f_4PR, f_5PR)$ đứng gần điểm không tương và cách xa vùng cấm nhất.

Thực tế thực nghiệm để xác định chế độ công nghệ STH đã xác định được vùng cấm:

$$y_1 > C_1 = 85.98;$$

$$y_2 > C_2 = 5.98;$$

$$y_3 > C_3 = 12.97;$$

$$y_4 > C_4 = 12.78;$$

$$y_5 > C_5 = 3.2$$

Xây dựng hàm mục tiêu tổ hợp R như sau:

$$\begin{cases} R^*(x_1, x_2, x_3) = \sqrt[5]{\prod_{j=1}^5 r_j(x_1, x_2, x_3)} \rightarrow \max \\ \Omega x = \{-1.414 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1.414\}; \quad y_2 \in [2, 6] \end{cases} \quad (21)$$

Trong đó:

$$r_1(x_1, x_2, x_3) = [(85.98 - y_1)/(85.98 - 59.035)] \text{ khi } y_1 \leq 158.98;$$

$$r_1(x_1, x_2, x_3) = 0 \text{ khi } y_1 > 85.98;$$

$$r_2(x_1, x_2, x_3) = [(5.98 - y_2)/(5.98 - 3.162)]$$

$$\text{khi } y_2 \leq 5.98;$$

$$r_2(x_1, x_2, x_3) = 0 \text{ khi } y_2 > 5.98;$$

$$r_3(x_1, x_2, x_3) = [(12.97 - y_3)/(12.97 - 4.981)]$$

$$\text{khi } y_3 \leq 12.97;$$

$$r_3(x_1, x_2, x_3) = 0 \text{ khi } y_3 > 12.97;$$

$$r_4(x_1, x_2, x_3) = [(12.78 - y_4)/(12.78 - 4.996)]$$

khi $y_4 \leq 12.78$;

$$r_4(x_1, x_2, x_3) = 0 \quad \text{khi } y_4 > 12.78;$$

$$r_5(x_1, x_2, x_3) = [(3.2 - y_5)/(3.2 - 0.594)]$$

khi $y_5 \leq 3.2$;

$$r_5(x_1, x_2, x_3) = 0 \quad \text{khi } y_5 > 3.2;$$

Nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Excel – Solver đã xác định được giá trị cực đại (21):

$$R^*_{\max} = \text{Max } R^*(x_1, x_2, x_3) = 0.987$$

$$\text{Với: } x_1S = 0.578;$$

$$x_2S = -1.41;$$

$$x_3S = -0.37$$

Thay x_1S, x_2S, x_3S vào phương trình (11), (12), (13), (14) và (15) xác định được:

$$y_1PS = 67.566;$$

$$y_2PS = 4.808 \in [2, 6];$$

$$y_3PS = 7.901;$$

$$y_4PS = 8.801;$$

$$y_5PS = 1.879;$$

$$IR = 100 - y_3PS = 92.099$$

Biến đổi sang biến thực:

$$Z_1 = 34.05 [^{\circ}\text{C}];$$

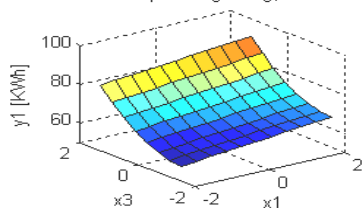
$$Z_2 = 0.009 [\text{mmHg}];$$

$$Z_3 = 13.26 [\text{h}]$$

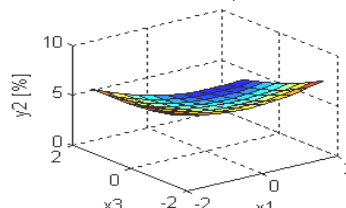
Như vậy, theo tính toán từ các mô hình (16), (17), (18), (19) và (20) thực nghiệm đã xác định chế độ công nghệ STH đảm bảo cho chuẩn tối ưu tổ hợp S đạt cực tiểu ứng với: nhiệt độ môi trường sấy **34.04** [$^{\circ}\text{C}$], áp suất môi trường sấy **0.009** [mmHg], thời gian sấy **13.26**[h]. Khi đó tổng chi phí năng lượng tạo ra 1 kg SP **67.566** [kWh], độ ẩm cuối cùng của SP đạt **4.808** [%], khả năng hút nước và hoàn nguyên trở lại của SP **92.099** [%], độ co rút thể tích của SP **8.801** [%] và lượng tổn thất vitamine C của SP **1.879** [%].

Từ kết quả thực nghiệm đã tiến hành ở **bảng 2** có thể thấy rằng, các kết quả tính toán tối ưu là phù hợp và đáp ứng tốt các mục tiêu đã đặt ra.

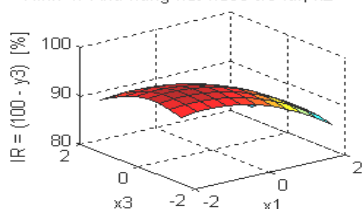
Hình 2. Chi phí năng lượng, $x_2 = -1.41$



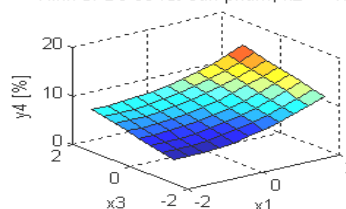
Hình 3. Độ ẩm của sản phẩm, $x_2 = -1.41$



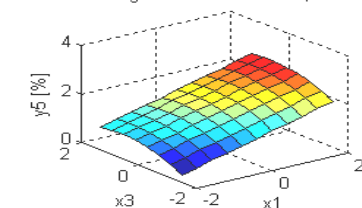
Hình 4. Khả năng hút nước trở lại, $x_2 = -1.41$



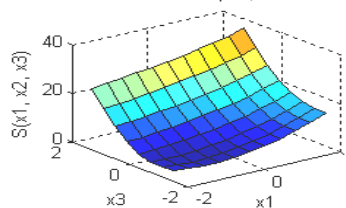
Hình 5. Độ co rút sản phẩm, $x_2 = -1.41$



Hình 6. Lượng tổn thất vitamine C, $x_2 = -1.41$



Hình 7. Hàm tối ưu S, $x_2 = -1.41$



Khi cố định áp suất môi trường sấy x_2R = -1.41, tương đương với $Z_2 = 0.009$ [mmHg], biểu diễn mối quan hệ giữa y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 và hàm tổ hợp R theo hai biến x_1, x_3 trên đồ thị 3D (xem hình 2, 3, 4, 5, 6, 7) sẽ thấy rõ điểm tối ưu của hàm tổ hợp R phù hợp với các hàm mục tiêu thành phần, lý thuyết cũng đã chứng minh ở trên không thể tìm ra một điểm khác với điểm tối ưu nằm trong tập hiệu quả Pareto tối ưu đứng gần điểm không tương hơn và cách xa vùng cấm nhất.

Để khẳng định kết luận này đã tiến hành thực nghiệm kiểm chứng kết quả sẽ được trình bày ở phần dưới đây.

3.4. Thực nghiệm kiểm chứng [4, 8]

Tiến hành quá trình STH tại nhiệt độ môi trường sấy **34.04** [$^{\circ}\text{C}$], áp suất môi trường sấy **0.009** [mmHg], thời gian sấy **13.26** [h] và nhận được kết quả chi phí năng lượng cho quá trình sấy tạo ra 1 kg SP **67.267** [kWh], độ ẩm cuối cùng của SP đạt **4.778** [%], khả năng hút nước và hoàn nguyên trở lại của SP **92.282** [%] (khả năng không hút nước hoàn nguyên trở lại của SP **7.718** [%]), độ co rút thể tích của SP **8.795** [%] và lượng tổn thất vitamine C của SP **1.834** [%].

Có thể thấy rằng kết quả tính toán tối ưu hóa quá trình STH bằng phương pháp vùng cấm cho kết quả hoàn toàn phù hợp với thực nghiệm.



Hình 8. Sản phẩm tôm bạc chân sơ bóc vỏ bỏ đầu STH

3.5. Xác lập chế độ công nghệ STH hoàn chỉnh [4, 8]

Với áp suất môi trường STH $P_{th} = 0.009$ [mmHg] thay vào mô hình toán (3.51) được thiết lập ở [3], xác định được hệ số cấp nhiệt của môi trường STH $\alpha_{bx} = 4.2057$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$], thay các thông số nhiệt – vật lý của tôm sú [7], vào mô hình toán truyền nhiệt tách ẩm trong điều kiện STH từ (3.22) đến (3.42) được thiết lập ở [3], xác định được thời gian STH ở giai đoạn 2: $\tau_{th} = 11.403$ [h], thời gian SCK ở giai đoạn 3: $\tau_{ck} = 1.857$ [h] với nhiệt độ thăng hoa

là -24.62 [$^{\circ}\text{C}$], nhiệt độ kết tinh của ẩm trong tôm sú -1.18 [$^{\circ}\text{C}$], [3,7].

Như vậy, chế độ công nghệ STH cho tôm bạc được thiết lập hoàn chỉnh như sau (có thể xem sơ đồ qui trình công nghệ [1,3,5]):

- **Giai đoạn 1:** giai đoạn lạnh đông: nhiệt độ môi trường lạnh đông -45°C , hệ số tỏa nhiệt môi trường lạnh đông 8.514 [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$], nhiệt độ bề mặt VLS -33.05 [$^{\circ}\text{C}$], nhiệt độ tâm VLS -11.97 [$^{\circ}\text{C}$], nhiệt độ trung bình VLS -24.62 [$^{\circ}\text{C}$].

- **Giai đoạn 2 (STH) và 3 (SCK):** nhiệt độ thăng hoa -24.62 [$^{\circ}\text{C}$], nhiệt độ môi trường sấy 34.05 [$^{\circ}\text{C}$], áp suất môi trường sấy 0.009

[mmHg], thời gian STH ở giai đoạn 2: 11.403 [h], khi đó nhiệt độ VLS ≥ -1.18 [$^{\circ}\text{C}$], thời gian SCK ở giai đoạn 3: 1.857 [h], tổng thời gian sấy là: 13.26 [h].

Khi STH tẩm bạc với qui trình đã được thiết lập ở trên, sản phẩm nhận được ở **hình 8**, có phí năng lượng và chất lượng sản phẩm như đã khẳng định ở trên.

4. KẾT LUẬN

Quá trình STH được nghiên cứu một cách hệ thống bằng phương pháp toán học kết hợp với các phương pháp nghiên cứu thực nghiệm.

Các phương trình hồi qui (16), (17), (18), (19) và (20) thu được từ thực nghiệm là các mô hình thống kê thực nghiệm mô tả rất tốt sự ảnh hưởng nhiệt độ môi trường sấy, áp suất môi trường sấy, thời gian sấy đến chi phí năng

lượng cho quá trình sấy, độ ẩm cuối cùng của sản phẩm, khả năng hút nước và hoàn nguyên trở lại, độ co rút thể tích của sản phẩm và lượng tổn thất vitamine C của sản phẩm.

Bằng phương pháp chuẩn tối ưu tổ hợp R (phương pháp vùng cấm) đã xác định chế độ công nghệ STH tối ưu, có chi phí quá trình nhỏ nhất và chất lượng sản phẩm được tạo ra tốt nhất.

Việc xác định chế độ công nghệ STH khá phức tạp nó vừa kết hợp giữa hai loại mô hình: truyền nhiệt lạnh đông, tách ẩm và thống kê thực nghiệm để xác định chất lượng sản phẩm tốt nhất, chi phí năng lượng bé nhất, vì vậy đòi hỏi người nghiên cứu phải nắm vững kiến thức STH.

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION WITH OPTIMAL STANDARD COMBINATION OF R APPLIED TO DETERMINE REGIME TECHNOLOGICAL FREEZE DRYING OF *PENAEUS MERGUIENSIS*

Nguyen Tan Dzung⁽¹⁾, Le Xuan Hai⁽²⁾, Trinh Van Dzung⁽²⁾

(1) University of Technical Education, HCM City

(2) University of Technology, VNU-HCM

ABSTRACT: This article presents research results of determinative regime technological freeze drying of *Penaeus Merguensis* by method to solve a multi-Objective optimization problem with optimal standard combination of R. Experimental research was carried out building objective functions to describe influence of technological element (temperature of sublimation environment, pressure of sublimation environment and times of freeze drying) during processing freeze drying.

By restricted zone (optimal standard combination of R) method determined optimal regime technological freeze drying have minimum energy expenditures/1 kg product, minimum humidity of material, maximum absorbent return of product, minimum contraction of product and minimum loss of vitamine C.

Keywords: Multi-Objective optimization, Optimization, Freeze drying

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Tấn Dũng, *Xây dựng và giải mô hình toán truyền nhiệt lạnh đông và truyền nhiệt tách ẩm trong điều kiện sấy thăng hoa*, Chuyên đề 2 chuyên đề tiên sĩ, Đại học Bách Khoa, (2009).
- [2]. Ludger O. Figura, Arthur A. Teixeira, Physical properties – Measurement and Applications (in Freeze – Drying), *Journal of Food Engineering*, Germany (2007).
- [3]. Nguyễn Tấn Dũng – Trịnh Văn Dũng – Trần Đức Ba, Nghiên cứu thiết lập mô hình toán truyền nhiệt tách ẩm trong điều kiện sấy thăng hoa, *Tạp chí Phát triển*

- Khoa học và Công nghệ ĐHQG Tp.HCM*, Tập 11, số 09, (2009).
- [4]. Lê Xuân Hải, Tối ưu đa mục tiêu ứng dụng trong quá trình chiết tách chất màu anthocyanin, *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ ĐHQG Tp.HCM*, Tập 11, số 09, (2008).
- [5]. Nguyễn Tấn Dũng, Nghiên cứu tính toán thiết kế, chế tạo hệ thống sấy thăng hoa công nghiệp DS-3 phục vụ cho sản xuất các loại thực phẩm cao cấp (Đề tài NCKH cấp bộ), *Tạp chí Giáo dục khoa học kỹ thuật*, số 3(1), (2007).
- [6]. Nguyễn Tấn Dũng - Trịnh Văn Dũng - Trần Đức Ba, Nghiên cứu khảo sát các tính chất nhiệt - vật lý của nhóm giáp xác (tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ) ảnh hưởng đến quá trình cấp nhiệt và tách ẩm trong sấy thăng hoa, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ thủy sản*, (2008).
- [7]. Nguyễn Tấn Dũng, *Khảo sát một số tính chất nhiệt vật lý của thủy sản nhóm giáp xác (tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ) ảnh hưởng đến quá trình cấp nhiệt tách ẩm trong sấy thăng hoa*, Chuyên đề 1 chuyên đề tiến sĩ, Đại học Bách Khoa, (2008).
- [8]. Nguyễn Tấn Dũng, *Xác lập chế độ công nghệ STH thủy sản: tôm sú, tôm bạc và tôm thẻ*, Chuyên đề 3 chuyên đề tiến sĩ, Đại học Bách Khoa, (2010).
- [9]. Luikov, A.V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies, *International Journal of Heat and mass transfer*, (1975).
- [10]. Luikov, A.V. Equations applicable to Sublimation drying, *Journal of Food Engineering*, (1972).
- [11]. Pikal, M.J.; M.L.; Shah, S. Mass and Heat transfer in vial freeze drying of pharmaceuticals: role of the vial. J. Pharm. Sci, *Journal of Food Engineering*, (1984).
- [12]. Liapis, A.I., Bruttini, R. and Pikal, M.J. Research and development needs and opportunities in freeze drying, Drying Technology, *Journal of Food Engineering*, (1996).
- [13]. Haugvalstad.G.H - Skipnes.D - Sivertsvik.M, Food free from preservative, *Journal of Food Engineering*, (2005).