

NGHIÊN CỨU MÁY TỰ ĐỘNG LÀM SẠCH DỊ VẬT KÍCH THƯỚC MICRO BẰNG KHÍ THỔI SIÊU ÂM TRONG CÔNG NGHIỆP BÁN DẪN

RESEARCH ON AN AUTOMATED ULTRASONIC AIRJET MACHINE FOR MICRO-SIZED CONTAMINANT (PARTICLE) REMOVAL IN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING

Lê Hữu Linh, Nguyễn Xuân Thuận, Đinh Công Trường
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về máy tự động làm sạch dị vật kích thước micro trên sản phẩm linh kiện điện tử/bán dẫn sử dụng trong phòng sạch dựa trên tiêu chuẩn class 10 và các tiêu chuẩn sản xuất của công ty Samsung Electro-Mechanics Việt Nam. Dựa vào bài nghiên cứu về dòng khí thổi siêu âm cũng như sản phẩm của nước ngoài, nhóm đã chế tạo, kiểm thử thành công đầu thổi siêu âm thông qua đánh giá sản phẩm thực tế; cũng như dựa vào kinh nghiệm để đề xuất thiết kế phổ quát dạng máy tự động cho các ứng dụng làm sạch dạng sản phẩm phẳng.

Từ khóa: Làm sạch bằng khí thổi; Khí thổi siêu âm; Máy tự động làm sạch; Làm sạch dị vật kích thước micro; Làm sạch trong công nghiệp bán dẫn.

ABSTRACT

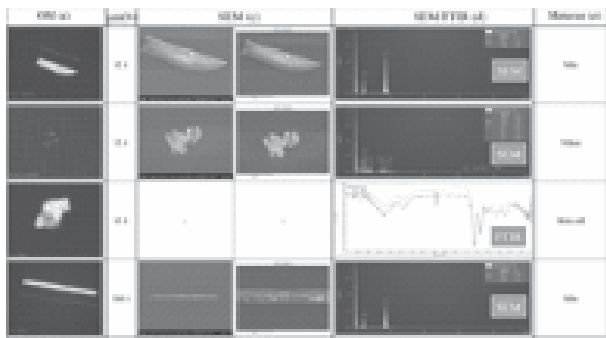
This paper presents research findings on an automated machine for removing micro-sized foreign particles from electronic/semiconductor components used in cleanrooms, adhering to Class 10 standards and production specifications of Samsung Electro-Mechanics Vietnam. Based on studies of ultrasonic air jet flow and foreign products, the team successfully fabricated and validated an ultrasonic air nozzle through actual product evaluation. Drawing from experience, we propose a universal design for an automated machine applicable to cleaning flat-surface products.

Keywords: Airjet cleaning; Ultrasonic airjet; Automated cleaning machine; Micro-sized particle removal; Semiconductor industry cleaning.



1. MỞ ĐẦU

Trong ngành công nghiệp sản xuất và lắp ráp linh kiện điện tử, bán dẫn hiện nay, làm sạch nguyên vật liệu, linh kiện trước khi lắp ráp đóng vai trò quan trọng và không thể thiếu do kích thước các sản phẩm ngày càng thu nhỏ, độ chính xác yêu cầu ngày càng cao nên ảnh hưởng của bụi lên sản phẩm là rất lớn. Mặc dù tiêu chuẩn phòng sạch ngày nay có thể đạt class 1 (1 hạt $\geq 0.5\mu\text{m}$ / 1 ft^3 - tiêu chuẩn Federal Standard 209E năm 1992 [1] – tiêu chuẩn mặc dù bị huỷ vào năm 2001 để thay bằng tiêu chuẩn ISO 14644-1 [2], dù vậy vẫn được các công ty sử dụng đến tận ngày nay) nhưng chỉ đảm bảo được rằng luồng không khí trong xưởng sản xuất đạt chuẩn. Sản phẩm vẫn có thể nhiễm bụi từ các nguồn phát sinh như từ cơ cấu máy, từ nguyên vật liệu, đặc biệt là từ người thao tác. Hình 1 mô tả ảnh dị vật kích thước micro bám lên sản phẩm được phóng to trên kính hiển vi quang học (OM), kính hiển vi điện tử (SEM) và máy phân tích quang phổ (FTIR) để xác định vật liệu được lấy từ báo cáo chất lượng hàng tháng của công ty Samsung Electro-Mechanics Việt Nam.



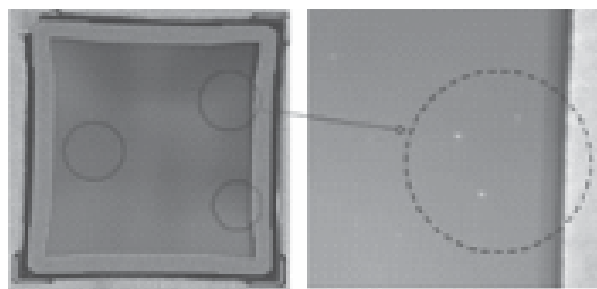
Hình 1. Ảnh dị vật kích thước micro bám lên sản phẩm

Việc làm sạch sản phẩm là yêu cầu bắt buộc với ngành lắp ráp thiết bị điện tử ngày nay để giảm thiểu lỗi tính năng sản phẩm; kết hợp với tự động hóa nhằm giảm thiểu tác động của

con người vào sản phẩm, cũng như cắt giảm nhân lực, qua đó nâng cao năng lực sản xuất thông qua giảm tỷ lệ lỗi do dị vật và cắt giảm chi phí nhân lực.

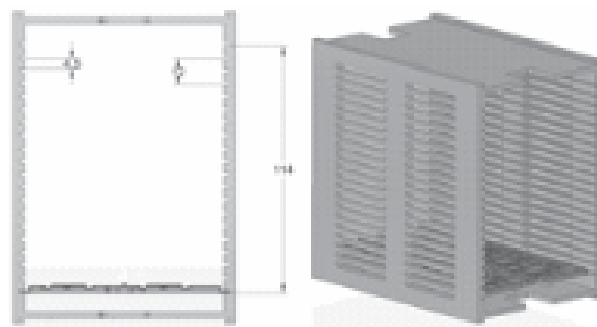
1.1. Đối tượng sản phẩm

Sản phẩm ở đây là các sản phẩm nhỏ phẳng như sensor, kính, bộ lọc. Trong nghiên cứu này, chúng tôi áp dụng với bộ lọc hồng ngoại trong camera của điện thoại hoặc ô tô. Hình 2 mô tả hình ảnh dị vật dính trên bộ lọc hồng ngoại trong camera được lấy từ báo cáo chất lượng hàng tháng của công ty Samsung Electro-Mechanics Việt Nam.



Hình 2. Bộ lọc hồng ngoại trong camera bị dính dị vật

Các sản phẩm được đặt trên khay đựng và đặt trong các hộp chứa có rãnh được gọi là “Giá đựng” để bảo quản, đây là thiết kế giá đựng khay sản phẩm phổ biến ở các công ty bán dẫn (Hình 3).



Hình 3. Hình Giá đựng

số Hamaker cho một số vật liệu trên bề mặt Silic như trên Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị Hamaker trong nước và không khí

Môi trường	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$	PSL/SiO_2
Nước	$1.6 \times 10^{-20} \text{ J}$	$6.5 \times 10^{-21} \text{ J}$	$1.0 \times 10^{-20} \text{ J}$
Không khí	$9.6 \times 10^{-20} \text{ J}$	$6.3 \times 10^{-20} \text{ J}$	$7.5 \times 10^{-20} \text{ J}$

Để hạt có thể tách khỏi bề mặt thì lực cản $F_d > F_{\text{ahd}}$.

$$F_d = 0.5\rho V^2 C_d A \quad (2)$$

Trong đó: ρ là mật độ không khí (kg/m^3); V - Vận tốc tương đối (m/s); C_d - Hệ số cản; A - Diện tích mặt cắt ngang của hạt ($\pi D^2/4$ cho hạt hình cầu) (m^2).

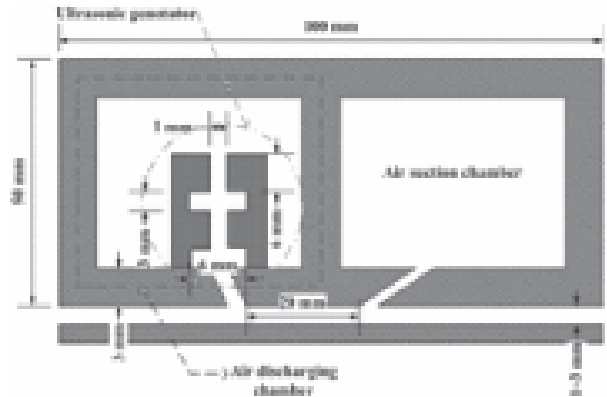
Hệ số cản C_d phụ thuộc vào hệ số R_e , với $0.5 < R_e < 1000$, ta có:

$$C_d = \frac{24}{R_e} * (1 + 0.15R_e^{0.687}) \quad (3)$$

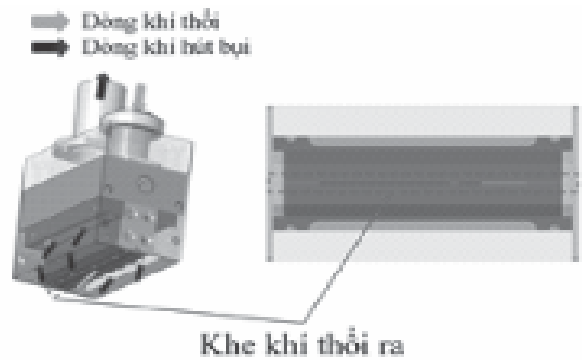
Trong đó:

$$R_e = \rho V D / \mu \quad (4)$$

Bổ sung thêm thông số μ (μ) là độ nhớt động lực học của chất lỏng ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$). Theo tài liệu [6], thay vì chỉ sử dụng khí thổi thông thường, ta có thể sử dụng hệ thống khí thổi siêu âm để giúp làm sạch hạt kích thước micro hiệu quả. Hệ thống cung cấp dòng khí nén đã qua các bộ lọc đi qua các rãnh với tốc độ cận âm để tạo ra dòng khí tốc độ cao và sóng siêu âm ở khe đầu ra được biểu diễn như trên Hình 5 và Hình 6. Từ nguyên lý đó, ta có thiết kế đầu thổi thành phẩm như Hình 5, trong đó khe thoát khí kích thước 0.45mm.

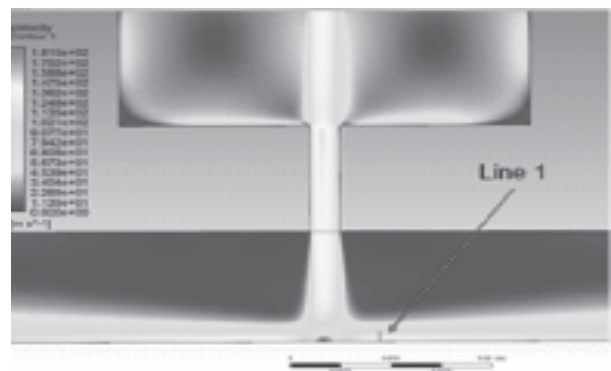


Hình 5. Hình dạng đầu thổi trong nghiên cứu



Hình 6. Hình ảnh thiết kế đầu thổi

Ngoài thổi thì cơ cấu có thêm phần khí hút, đây là bộ phận quan trọng để hạn chế trường hợp tái nhiễm dị vật sau khi thổi. Tiến hành mô phỏng dòng khí thổi đầu ra trên phần mềm Ansys Fluent 2024 R2 [7] để xác định tốc độ khí tác động lên hạt bụi như trên Hình 7.



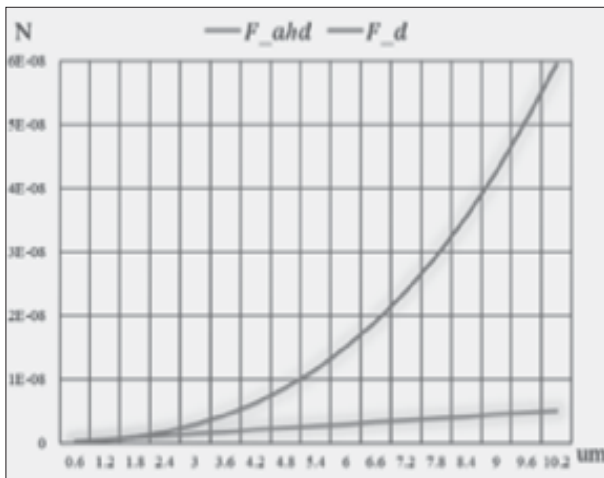
Hình 7. Mô phỏng dòng khí thổi vào bề mặt sản phẩm ở khoảng cách 2mm

Xuất kết quả mô phỏng, ta có mối quan hệ độ cao bề mặt và tốc độ dòng chảy như trên Bảng 2.

Bảng 2. Tốc độ dòng khí sát bề mặt

Y (um)	0.0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.6	4.2	4.8	5.4	10.2
Tốc độ khí (m/s)	0.0	1.9	3.7	5.6	7.4	11.1	13.0	14.8	16.6	30.9

Từ các công thức (1), (2), (3), (4) và Bảng 2, ta tính được lực cản và lực Van Der Waals tác động giá trị gần đúng vào hạt. Trong đó, lực cản xét giá trị gần đúng xem như tốc độ gió giảm đi một nửa nếu thổi vào tâm hạt (Hình 8).



Hình 8. Đồ thị lực cản và lực Van der Waals của hạt

Để hạt tách ra khỏi bề mặt thì lực cản khí thổi của hạt phải lớn hơn lực Van der Waals. Kết quả mô phỏng và tính toán được biểu thị qua hình 8 – sự tương quan của lực cản (F_d) và lực VDW (F_{ahd}) dựa vào tốc độ gió và đường kính hạt. Hình 8 cho thấy từ độ cao 1 μm trở lên thì lực cản (F_d) luôn lớn hơn lực VDW nên đầu thổi có thể loại bỏ được các hạt từ kích thước 1 μm trở đi, thỏa mãn bài toán đề ra.

3. THIẾT KẾ MÁY TỰ ĐỘNG

Thiết kế phải đạt được hai mục tiêu:

- Có thể lấy sản phẩm từ Giá đựng ra và đưa qua đầu thổi siêu âm, sau đó đưa vào Giá đựng đầu ra;

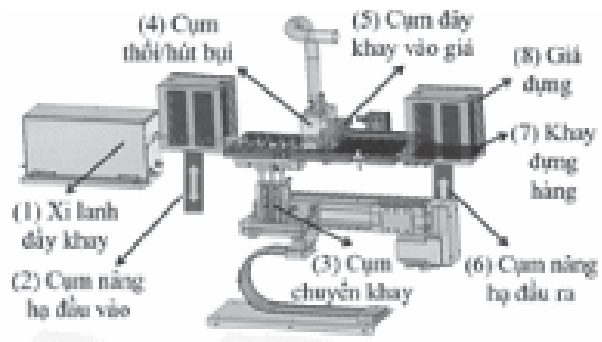
- Tiêu chuẩn máy tự động của công ty Samsung Điện-Cơ là 1 người có thể vận hành được 4 máy;

- Máy có tỷ lệ làm sạch đạt 80%;

- Máy quản lý được sản phẩm trên hệ thống thông qua barcode.

3.1. Thiết kế cụm cơ cấu đẩy tray ra và vào Giá đựng

Một Giá đựng có thể chứa 10 tray sản phẩm được xếp vào vào rãnh ở mặt trong của Giá đựng. Các rãnh này cách đều nhau với khoảng cách 12 mm. Vì thế, phương án là sử dụng hệ trục vít me để nâng/hạ Giá đựng và sử dụng xi lanh để đẩy tray ra ngoài như trên Hình 9.



Hình 9. Cơ cấu đẩy tray, kéo tray qua cụm thổi

3.2. Phân tích hoạt động

Để 1 người có thể vận hành 4 máy thì chúng ta cần phải liệt kê các thao tác của máy, từ đó tính toán cứ bao nhiêu thời gian thì người thao tác phải đưa vào/lấy hàng ra một lần; rồi đưa ra thiết kế phù hợp.

Mô phỏng và tính thời gian thao tác như trong Bảng 3. Thời gian làm sạch với một tray sản phẩm là 18 giây (Gọi là Cycle time – C/T). Tuy nhiên, để tối ưu hoạt động, một số thao tác có thể xảy ra đồng thời để sản phẩm có thể qua cụm thổi liên tục mà không phải chờ khay trước đó đi ra hoàn toàn. Ví dụ: khi khay số 1 chạy qua hết cụm thổi, thì khay số 2 có thể vào băng chuyển luôn thay vì chờ đợi khay số 1 hoàn thành vào giá đựng đầu ra mới vào; do cả hai khay đã ở vị trí an toàn để tránh rủi ro va chạm hai khay. Từ đó, ta có sơ đồ mô phỏng hoạt động bên dưới. Trong đó, ký hiệu mũi tên $\Rightarrow$ thể hiện mối liên hệ với thao tác tuần tự trước đó.

Bảng 3. Liệt kê trình tự thao tác làm sạch khay lấy từ giá đựng

Hoạt động	Thời gian thao tác (giây)
Cụm (2) hạ vị trí khay 1	0.5
Xi lanh (1) đẩy	1
Xi lanh (1) lùi	0.5
Cụm (3) nâng lên đỡ khay	0.5
Cụm (3) bật hút	0.5
Cụm (4) thổi	5.5
Cụm (3) kéo tray qua thổi	5.5
Cụm (3) ngừng hút	0.5
Cụm (3) hạ xuống	0.5
Cụm (3) lùi về	0.5
Cụm (5) hạ xuống	0.5
Cụm (5) gạt khay vào giá	1
Cụm (5) lên	0.5
Cụm (5) lùi về	0.5
Tổng	18



Hình 10. Mô phỏng thao tác tuần tự khi làm sạch khay

Vậy cứ 8 giây thì máy lại hoàn thành làm sạch một khay đưa vào giá đựng (gọi là Tact time – T/T) (Hình 10). Vậy để hoàn thành làm sạch một giá đựng chứa 10 khay thì cần 80 giây (1.33 phút). Gọi mỗi lần thay giá đựng ở đầu vào hoặc đầu ra là một lần thao tác. Vậy, với mỗi lần đưa vào máy một giá sản phẩm thì cứ 10 giây, người đứng máy lại phải thao tác một lần sản phẩm.

Bảng 4. Tính toán thời gian giữa hai thao tác của nhân viên

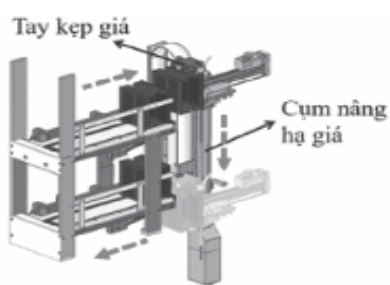
	Thời gian hoàn thành một giá đựng (giây)	Số thao tác (lần)	Chu kỳ thao tác/1 máy (giây)	Chu kỳ thao tác/4 máy (giây)
Máy đưa vào 1 Giá đựng	80	2	40	10

Theo Bảng 4 thì thời gian 10 giây quá ngắn với tiêu chuẩn đề ra là 40 giây. Vì thế, với tiêu chuẩn giữa hai lần thao tác là 40 giây thì số thời gian hoàn thành làm sạch một máy cần là 360 giây, đồng nghĩa với lượng giá đựng cần đưa vào là 4 giá. Ngoài ra, khi chỉ đưa vào một giá sản phẩm thì máy phải dừng hoàn toàn khi nhân viên thao tác để đảm bảo an toàn, điều đó

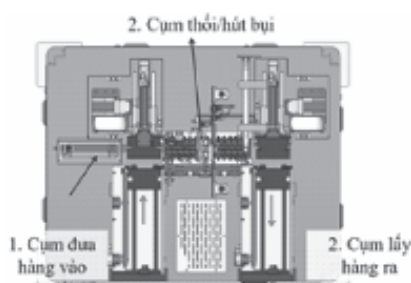
làm giảm sản lượng. Vì thế, ngoài việc tăng số lượng giá đưa vào một lần thì phải làm cho máy có thể chạy không dừng để tăng sản lượng.

3.3. Thiết kế nâng cao số lượng Giá đựng

Cụm đưa hàng vào và lấy hàng ra có chung thiết kế. Giá đựng hàng sẽ được đặt trên băng tải đưa vào, có thể đặt cùng lúc 4 cái. Sau đó, cụm nâng hạ sẽ kẹp lấy Giá và đưa xuống vị trí đẩy tray vào vị trí thổi. Băng tải được truyền động bởi động cơ AC tích hợp hộp số giảm tốc tỷ số truyền 20. Thiết kế tổng thể được mô tả như trên Hình 11.



(a) Mô hình 3D



(b) Mặt cắt 2D

Hình 11. Cụm đưa hàng vào với số lượng 4 Giá đựng cùng lúc

3.4. Cụm ngăn ngừa bụi rơi vào sản phẩm

Để bụi không rơi vào sản phẩm thì máy cần có thêm các phần sau:

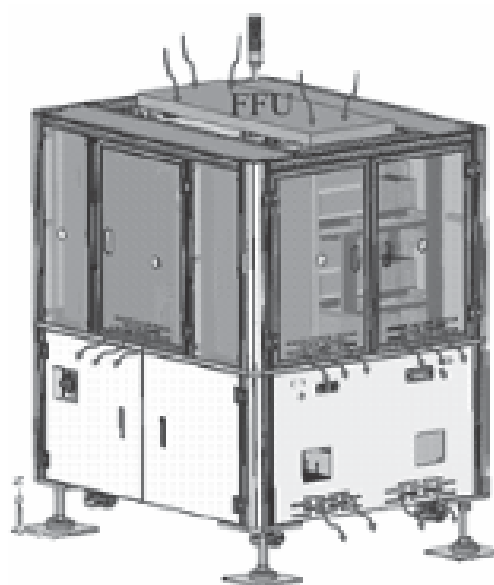
- Tạo buồng áp lực dương: Sử dụng quạt lọc-thổi không khí (FFU-Fan Filter Unit)

từ trần xuống để luôn tạo áp lực trong thiết bị lớn hơn bên ngoài thiết bị, khiến bụi bên ngoài không xâm nhập được. Khí bên trong tràn ra ngoài theo các rãnh trên tấm che xung quanh máy (Hình 12).

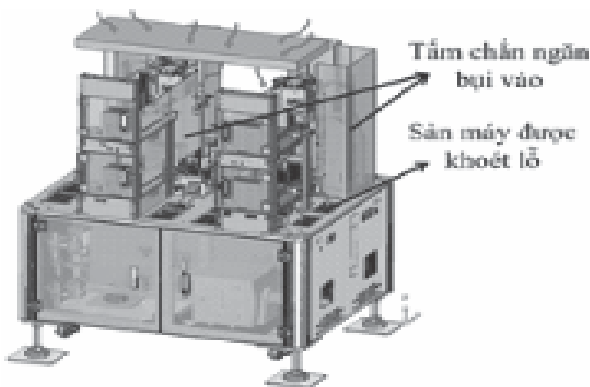
- Sàn máy phải được đục lỗ để không khí lưu thông từ trên xuống (Hình 13).

- Che chắn khu vực làm sạch với các khu vực khác. Do trong máy có nhiều cơ cấu chuyển động nên dễ tạo ra dị vật do mài mòn, cần phải ngăn cách vùng gia công và các vùng khác để tránh bị nhiễm bụi.

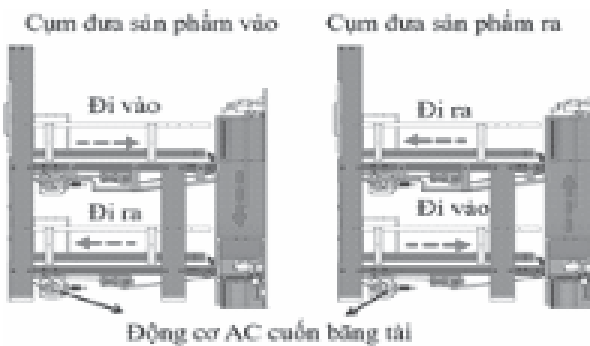
- Hạn chế nhiễm dị vật thông qua điều hướng dòng chảy sản phẩm. Nguyên tắc là các chuyển động phải nằm dưới sản phẩm để tránh bụi rơi vào sản phẩm. Áp dụng nguyên tắc này thì ở đầu vào: các giá đựng khay phải ở hàng trên, sau khi đưa hết khay vào điểm thổi thì giá đựng đi ra bên dưới; còn ở đầu ra thì ngược lại, giá đựng trống để bên dưới, sau khi tiếp nhận hàng đã qua làm sạch thì được đẩy ra lên trên như Hình 14.



Hình 12. Tạo áp lực dương trong máy nhờ FFU



Hình 13. Sàn máy được khoét lỗ và tấm chắn ngăn bụi



Hình 14. Chiều di chuyển của giá đựng khay hàng

Ngoài ra, dựa vào nguyên tắc trên thì ở đầu vào, thứ tự khay được lấy ra sẽ từ dưới lên trên; còn ở đầu ra thì thứ tự xếp tray vào từ trên xuống dưới.

3.5. Hệ thống điều khiển

Hệ thống điều khiển của máy thổi được sử dụng là thiết bị PLC dùng Q series (Q03ude) của Mitsubishi để điều khiển. Màn hình hiển thị sử dụng HMI Weitek của hãng Mitsubishi.

4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Kiểm chứng môi trường đánh giá

Để có kết quả chính xác, loại bỏ các tác nhân từ môi trường ảnh hưởng tới kết quả thì cần kiểm chứng môi trường đạt chuẩn hay không. Quy trình kiểm chứng được thực hiện theo các bước sau:

Bước 1: Tốc độ gió đạt $0.51\text{m/s} > \text{tiêu chuẩn } 0.1\text{m/s} \rightarrow \text{Đạt}$.

Bước 2: Khói đi thẳng vào các vị trí khoét lỗ, không bị quần, rối $\rightarrow \text{Đạt}$.

Bước 3: Dòng khí thổi ra chỉ có 1 hạt $0.3\mu\text{m} < \text{tiêu chuẩn } 10 \text{ hạt } 0.3\mu\text{m} \rightarrow \text{Đạt}$.

Kết luận: Đủ điều kiện tiến hành đánh giá chất lượng (Tiêu chuẩn áp dụng cho tập đoàn Samsung Điện Cơ).

4.2. Phương pháp và kết quả đánh giá

Có hai tiêu chuẩn và phương pháp đánh giá hiệu quả làm sạch:

- Phương pháp đánh giá quá trình tạo mẫu: Tạo mẫu sản phẩm dính dị vật bằng cách rắc hạt silicat, tiếp theo cho sản phẩm qua máy thổi bụi, sau đó tiến hành ngoại quan qua kính hiển vi. Tiêu chuẩn tỉ lệ loại bỏ dị vật là $\geq 80\%$ (Bảng 5).

Bảng 5. Kết quả đánh giá thông qua phương pháp tự tạo mẫu bằng hạt silica

Tiêu chuẩn	Lần	Đưa vào	Số hàng đạt	Tỷ lệ đạt	Spec (%)	Đánh giá
Tỷ lệ loại bỏ dị vật của thiết bị thổi bụi siêu âm	1	12	12	100%	$\geq 80\%$	Đạt
	2	12	11	91.7%		
	SUM	24	23	95.8%		

Thông số kỹ thuật đánh giá dựa trên tiêu chuẩn khuyến nghị của hãng Shinko.

- Áp suất thổi đầu vào 20 kPa;
- Cấp độ hút vào -9 kPa;
- Khoảng cách thổi 2mm.

- Phương pháp đánh giá số lượng lớn trên sản phẩm thực tế. Dựa trên phẩm thực tế để đánh giá sự hiệu quả là phương pháp phản ánh mang tính thực tiễn nhất. Ngoài ra, cũng để

thử nghiệm và tìm thông số thổi phù hợp. Các sản phẩm sẽ được ngoại quan qua kính hiển vi trước để xác định vị trí dị vật. Nếu sau khi thổi mà có dị vật dính ở vị trí khác có nghĩa là bị tái nhiễm.

Khảo sát thông số kỹ thuật: Đánh giá thử nghiệm với sản phẩm model XX tháng 07/2024 ở công ty Samsung Điện được mô tả như trên Bảng 6.

Bảng 6. Tìm bộ thông số kỹ thuật phù hợp cho bộ thổi

Đánh giá USC		25-Thg7		26-Thg7		27-Thg7		28-Thg7		1-Thg8	
		Lot 1	Lot 2	Lot 1	Lot 2	Lot 1	Lot 2	Lot 1	Lot 2	Lot 1	Lot 2
Input (ea)		2,880	1,080	2,880	2,160	2,160	2,160	2,160	2,520	1,440	1,440
OK (ea)		2,852	1,069	2,874	2,156	2,157	2,158	2,157	2,517	1,439	1,439
Không loại bỏ (ea)		4	1	1	3	21	17	3	2	1	1
Tái nhiễm (ea)		24	10	5	1	2	1	-	1	-	-
PPM		9,722	10,185	2,083	1,852	10,648	8,333	1,389	1,190	694	694
Thông số kỹ thuật	Khoảng cách USC đến bề mặt cần làm sạch (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Tốc độ khay đi qua USC (mm/s)	40	40	30	30	30	30	30	30	30	30
	Mức khí hút USC (1~7)	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7
	Áp lực khí thổi USC (Mpa)	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2



Từ đánh giá, ta đưa ra được thông số điều kiện sản xuất là áp lực thổi 0.2 Mpa, áp lực hút mức 7 ở bộ hút ~-9 kPa, tốc độ khay đi qua vùng thổi 30mm/s. So sánh với sản phẩm chưa qua máy thổi như trên Bảng 7.

Bảng 7. So sánh chất lượng sản phẩm không thổi siêu âm và có thổi siêu âm

	Normal (chưa qua USC)	Lot test (đã qua USC)	Spec (%)	Đánh giá OK/NG
Ngày lấy kết quả	20→28/07/2024	01/08/2028	>50%	OK
Đưa vào (ea)	164,635	1439		
NG (ea)	1852	1		
Tỉ lệ (ppm)	11,249	694		
Tỉ lệ cải tiến được (%)	= [(11249-694)/2515]*100 = 93.8%			

Đánh giá dựa vào lỗi tính năng ở công đoạn sau của sản phẩm. Kết quả đánh giá tỷ lệ cải thiện tới 93.8% so với sản phẩm chưa qua máy thổi bụi.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đưa ra được một thiết kế hiệu quả cho đầu thổi siêu âm cũng như cơ cấu máy tự động làm sạch sản phẩm dạng phẳng, kích thước hợp lý. Nghiên cứu đã được ứng dụng vào sản xuất trong công nghiệp và mang lại hiệu quả cao, giảm chi phí so với mua sản phẩm của nước ngoài.

Hiện nay, khi sản xuất với một số sản phẩm, thì tỷ lệ làm sạch có sự sụt giảm. Hướng đi tiếp theo của đề tài là nghiên cứu sâu với vật liệu bám dính để đưa ra đầu thổi hiệu quả hơn, hoặc tạo bộ thổi có thể thay đổi được tần số liên tục trong quá trình làm sạch để phù hợp với tần số cộng hưởng của dị vật nhỏ.❖

Ngày nhận bài: 06/9/2024
Ngày phản biện: 24/10/2024

Tài liệu tham khảo:

[1]. FEDERAL STANDARD 209E, “Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones”. Institute of Environmental Sciences, 940 E. Northwest Highway, Mount Prospect, Illinois 60056, U.S. General Services Administration, 1992.

[2]. INTERNATIONAL STANDARD, “Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration”. ISO 14644-1, American National Standard, ANSI/IEC/ISO 14644-1:2015.

[3]. Kazemi, M., Treichel, H., and Ligutom, R. (2011), “Substrate cleaning using ultrasonics/megasonics”. In ASMC (Advanced Semiconductor Manufacturing Conference) Proceedings. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2011>.

[4]. Kohli, R., and Mittal, K. L. (2012), “Developments in Surface Contamination and Cleaning: Detection, Characterization, and Analysis of Contaminants”. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64375-0>.

[5]. Tardif, F., Danel, A., and Raccurt, O. (2005), “Understanding of wet and alternative particle removal processes in microelectronics: theoretical capabilities and limitations”. Journal of Telecommunications and Information Technology, (1), pp. 11-19. <https://doi.org/10.26636/jtit.2005.1.297>.

[6]. Choi, H., and Kim, T. (2012), “Numerical simulation of ultrasonic generator in dust removing system”. In Advanced Materials Research (Vol. 488-489, pp. 1446-1450). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.1446>.

[7]. Ansys Fluent 2024 R2, 2024, ANSYS Inc