

PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG PHẦN TỬ RỜI RẠC - TRỢ GIÚP THIẾT KẾ VÀ XÁC ĐỊNH THÔNG SỐ VẬN HÀNH THIẾT BỊ PHÂN LOẠI CỦA QUẢ THEO KÍCH THƯỚC

DISCRETE ELEMENT SIMULATION - ENHANCING THE DESIGN AND WORKING PARAMETERS OF FRUIT SIZING EQUIPMENT

Nguyễn Thị Hạnh Nguyễn¹, Lê Tiến Thịnh^{2,*},
Nguyễn Xuân Thiết¹, Lê Minh Lư¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.036>

TÓM TẮT

Đối với củ quả nông sản, việc phân loại theo kích cỡ là chỉ tiêu chất lượng quan trọng phục vụ một số mục đích như sở thích của người tiêu dùng, yêu cầu của thị trường, định giá thành sản phẩm, quy cách đóng gói, các nguyên công chế biến sau thu hoạch. ... Nghiên cứu này thực hiện các mô phỏng phần tử rời rạc nhằm trợ giúp tối ưu thiết kế và thông số vận hành thiết bị phân loại kích thước củ quả nông sản dạng lồng quay (sàng lồng). Các mô phỏng tập trung xác định khả năng di chuyển của củ quả nông sản dọc theo lồng quay; thông số vận hành tối ưu của thiết bị (vận tốc góc của lồng quay) đối với năng suất thiết kế. Ma trận mô phỏng với 7 trường hợp đã được đề xuất và thực hiện. Để các quả có thể di chuyển dễ dàng dọc theo lồng quay thì các thanh khung lồng được làm nghiêng theo chiều quay của lồng một góc là 12°. Đối với năng suất thiết kế 7,2 tấn/giờ, lồng có đường kính 800mm, có 5 khoang phân loại dài 1000mm mỗi khoang, thì vận tốc góc của lồng quay tối ưu là 12,5v/ph. Phương pháp mô phỏng phần tử rời rạc hoàn toàn có thể trợ giúp các kỹ sư/nghiên cứu viên trong việc tính toán thiết kế thông số vận hành của các thiết bị phân loại củ quả nông sản, giảm thiểu việc chế tạo các nguyên mẫu "prototype", việc mà sẽ rất tốn kém về chi phí, nhân lực và thời gian.

Từ khóa: Thiết bị phân loại kích thước; mô phỏng phần tử rời rạc; củ quả nông sản; thông số vận hành.

ABSTRACT

For agricultural fruits, the classification by size is an important quality indicator that serves a number of purposes such as consumer preferences, market requirements, product pricing, packaging specifications, and post-harvest processing operations. ... This study performed Discrete Element simulations to assist in the design and determination of working parameters of the rotary drum sizing equipment. Simulations focused on determining the motion of the fruits along the rotating axis and working parameters of the equipment (angular velocity of the rotary drum). Simulation matrix with 7 cases has been proposed and conducted. In order for the fruits to move easily along the rotating drum, the drum frame bars are tilted in the direction of rotation of the cage at an angle of 12°. For a yield of 7.2 tons/h, a drum with a diameter of 800mm, with 5 sorting chambers of 1000mm long each, the optimal angular velocity of the rotating drum is 12.5 rpm. The Discrete Element simulation method can fully assist engineers/researchers in designing working parameters of fruit sorting equipment, minimizing the production of prototypes, which is currently high in terms of cost, manpower and time.

Keywords: Fruit sizing equipment; discrete element simulation; agricultural products; working parameters.

¹Học viện Nông nghiệp Việt Nam

²Trường Đại học Phenikaa

*Email: thinh.letien@phenikaa-uni.edu.vn

Ngày nhận bài: 13/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 19/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

1. GIỚI THIỆU

Phân loại sản phẩm theo các kích cỡ khác nhau là một quy trình được sử dụng phổ biến trong ngành nông nghiệp và thực phẩm. Đối với củ quả nông sản, việc phân loại theo kích cỡ là chỉ tiêu chất lượng quan trọng phục vụ một số mục đích như chất lượng, sở thích của người tiêu dùng, yêu cầu của thị trường, định giá thành sản phẩm, quy cách đóng gói,

các nguyên công chế biến sau thu hoạch... Có thể nhận thấy rằng người tiêu dùng rất quan tâm đến chất lượng ngoại hình của củ quả nông sản. Ngoài ra, việc phân loại thành các kích thước đồng đều giúp cho quá trình đóng gói và vận chuyển hiệu quả vì củ quả nông sản có kích thước đồng đều sẽ giảm lãng phí và giảm thiểu nhu cầu đóng gói quá mức từ đó giảm chi phí vận chuyển và giảm tác động môi trường.

Thêm vào đó, việc phân loại kích thước củ quả nông sản còn cho phép xử lý hiệu quả hơn trong quá trình chế biến sau thu hoạch. Các loại củ quả nông sản có cùng kích cỡ có thể được xử lý cùng nhau, dẫn đến quy trình làm việc suôn sẻ hơn và giảm thời gian xử lý. Ngoài ra, các loại củ quả nông sản có kích thước đồng đều sẽ chín với tốc độ ổn định hơn, giúp quản lý quá trình chín để phân phối và bán dễ dàng hơn. Nhìn chung, việc phân loại củ quả nông sản thành các kích cỡ khác nhau giúp nâng cao chất lượng sản phẩm, tạo điều kiện xử lý hiệu quả và đảm bảo sản phẩm đáp ứng nhu cầu và sở thích của thị trường. Nó mang lại lợi ích cho cả người sản xuất và người tiêu dùng, dẫn đến chuỗi cung ứng củ quả nông sản thành công và có lợi hơn [1].

Trong những tiêu chuẩn cần phân loại (kích thước, trọng lượng, hình dạng, màu sắc, chất lượng) thì kích thước quả là thông số rất quan trọng và được sử dụng rộng rãi. Hiện nay có nhiều nhà khoa học và các công ty quan tâm nghiên cứu, phát triển các thiết bị phân loại củ quả nông sản theo kích thước. Tùy vào hình dạng của củ quả nông sản mà đã có rất nhiều nguyên lý phân loại được phát triển, có thể dạng cầu như táo, mận, cam, chanh; dạng côn như cà rốt; dạng trụ như dưa chuột, dưa; dạng đặc biệt như lê, xoài. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung vào thiết bị phân loại củ quả nông sản dạng cầu. Đối với dạng này, thiết bị phân loại dạng lồng quay (sàng lồng) có ưu điểm là năng suất lớn, công suất điện nhỏ, có khả năng tự động hoàn toàn. Tuy nhiên có nhược điểm là không phù hợp với vật liệu bám dính, cần có cánh dẫn hướng đối với một số trường hợp.

Hiện nay, ứng dụng của phương pháp mô phỏng phần tử rời rạc (Discrete Element Method - DEM) trong việc tính toán thiết kế và tối ưu thông số vận hành thiết bị trong nông nghiệp đang được phát triển rộng rãi. Van Zeebroeck và cộng sự [2] mô phỏng phần tử rời rạc quá trình đóng gói và vận chuyển trái cây để ước tính tỉ lệ hư hỏng. Ở một nghiên cứu khác, Romuli và cộng sự [3] mô phỏng quá trình bóc vỏ quả cây dầu mè để tối ưu hoá thiết bị tách vỏ. Bên cạnh đó, Cotzee [4] áp dụng phương pháp mô phỏng để mô phỏng máy rải phân vô cơ. Ngoài ra, Le và cộng sự [5] nghiên cứu cơ tính và lực nứt vỡ tối hạn của hạt đậu tương sử dụng phương pháp mô phỏng hạt rời rạc.

Tuy nhiên, hiện nay việc áp dụng phương pháp mô phỏng này trong các thiết bị phân loại củ quả nông sản là chưa nhiều. Cần chú ý rằng các mô phỏng hoàn toàn có thể được áp dụng để giảm thiểu việc chế tạo các nguyên mẫu "prototype", việc mà sẽ rất tốn kém về chi phí, nhân lực và thời gian. Do đó, nghiên cứu này đề xuất áp dụng phương pháp mô phỏng phần tử rời rạc trong việc trợ giúp tối ưu thiết kế và thông số vận hành thiết bị phân loại củ quả nông sản dạng lồng quay (sàng lồng).

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

2.1.1. Củ quả nông sản phân loại và cơ lý tính

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả hướng tới tối ưu thiết kế và thông số vận hành của thiết bị phân loại theo kích

thước dạng lồng quay cho quả mận chín (sàng lồng). Quả mận chín với các thông số cơ lý tính được tra cứu trực tiếp từ tài liệu tham khảo [6], với thông số cụ thể như bảng 1.

Bảng 1. Thông số cơ lý tính của quả mận

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng	1060	kg/m ³
Mô đun đàn hồi	0,73	MPa
Hệ số Poisson	0,268	
Hệ số ma sát trượt với kim loại	0,169	
Hệ số ma sát trượt với cao su	0,194	
Đường kính nhỏ nhất	20	mm
Đường kính lớn nhất	65	mm
Biểu đồ phân bố đường kính	Phân phối đều liên tục	
Lực phá vỡ	72	N
Ứng suất tiếp xúc lớn nhất	283	kPa

2.1.2. Thiết bị phân loại dạng lồng quay

Trong nghiên cứu này, thiết bị phân loại dạng lồng quay được sử dụng để thực hiện mô phỏng Phần tử rời rạc. Thiết bị này hoạt động dựa trên nguyên lý lợi dụng lực ly tâm và trọng lực của củ quả nông sản để phân loại. Hình 1 thể hiện sơ đồ các bộ phận của thiết bị và nguyên lý phân loại. Các quả mận được đưa vào trong khoang của lồng quay với lưu lượng nhất định. Lồng quay có đường kính 800mm. Lồng quay được thiết kế với 5 khoang riêng biệt có chiều dài 1000mm mỗi khoang. Mỗi khoang có kích cỡ khe hở ở tầng dẫn từ đầu vào tới đầu ra (32mm tới 72mm). Đối với phân loại củ quả nông sản như mận, không cần thiết bố trí cánh gạt bên trong lồng quay.

Các quả mận được chuyển động liên tục và di chuyển dọc theo lồng quay từ đầu vào tới đầu ra. Tuy nhiên, để các quả mận có thể di chuyển dễ dàng dọc theo lồng quay từ đầu vào tới đầu ra, có nhiều nguyên lý có thể áp dụng như đặt nghiêng lồng quay so với phương nằm ngang, hoặc sắp xếp các thanh làm khung lồng với góc nghiêng β như đề xuất trong nghiên cứu này. Góc nghiêng β được định nghĩa như trong hình 1, biến thiên với 3 giá trị 0° , 5° và 12° như miêu tả trong hình 2. Việc mô phỏng Phần tử rời rạc sẽ trợ giúp tìm được thiết kế tối ưu cho góc β . Cuối cùng, dưới các khoang phân loại sẽ có các máng dẫn củ quả nông sản ra các khay đựng tương ứng. Những quả có kích thước lớn vượt ngoài khoảng phân loại sẽ được dẫn đến điểm cuối của lồng quay.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

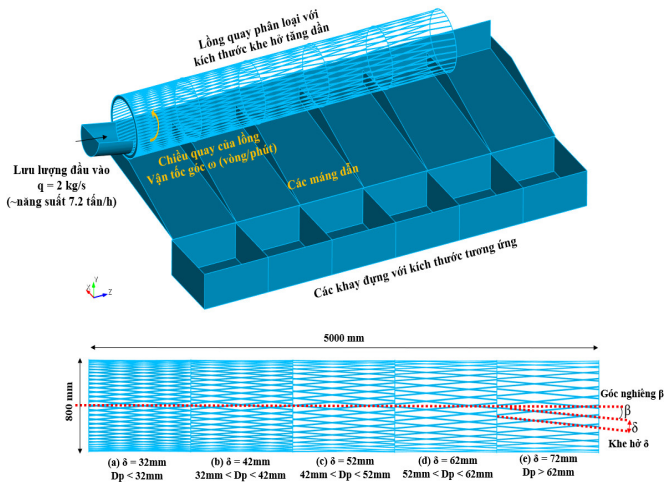
Mô hình mô phỏng phần tử rời rạc (Discrete Element Method - DEM) được phát triển dựa trên mô phỏng chuyển động của các hạt rời rạc tuân theo các định luật của Newton [7]. Do đó, các chuyển động của các hạt được xác định thông qua việc giải các phương trình chuyển động tịnh tiến và quay của các hạt riêng rẽ. Đối với hạt số thứ tự i , phương trình chuyển động tịnh tiến được cho như sau:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij} + m_i g \quad (1)$$

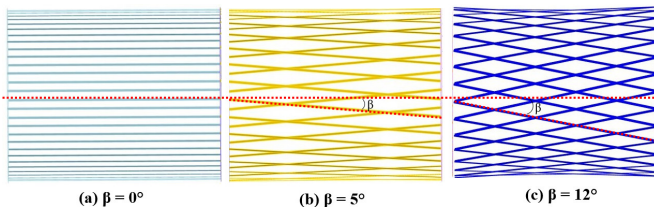
Trong đó, m_i là khối lượng của hạt i , v_i là vận tốc, t là thời gian, F_{ij} là lực tiếp xúc tác dụng lên hạt i từ hạt j và g là gia tốc trọng trường. Phương trình chuyển động quay được biểu diễn như sau:

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j T_{ij} \quad (2)$$

trong đó, I_i là mômen quán tính, ω_i là vận tốc góc và T_{ij} là mômen xoắn tác dụng lên hạt i từ hạt j . Trong mô hình DEM, lực tiếp xúc thường được mô hình hóa bằng lò xo, thanh trượt và thanh trượt ma sát. Một trong những mô hình tiếp xúc được sử dụng nhiều nhất là mô hình Hertz-Mindlin [8], bao gồm nhiều tham số khác nhau như mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, mô đun cắt, hệ số ma sát tĩnh, hệ số ma sát lăn và hệ số hoàn nguyên. Các hệ số này liên quan đến mối quan hệ tương tác giữa hạt/hạt và hạt/chi tiết máy, được đưa ra để mô tả sự mất mát năng lượng khi các bộ phận tương tác với nhau [5].



Hình 1. Thiết bị phân loại dạng lồng quay và các thông số



Hình 2. Ba thiết kế để xuất cho góc β để thực hiện mô phỏng

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

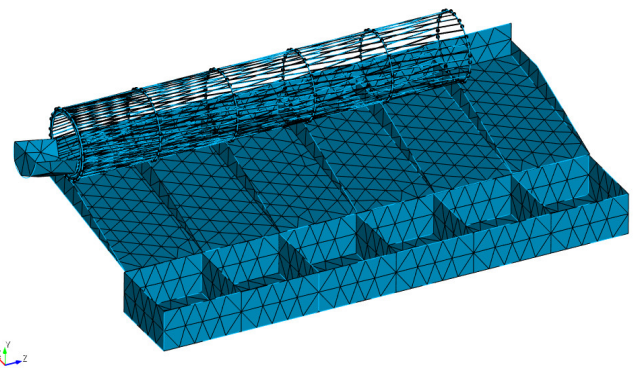
3.1. Thông số đầu vào mô phỏng

Trong nghiên cứu này, phần mềm ALTAIR EDEM đã được sử dụng cho các mô phỏng phần tử rời rạc. Bảng 2 đưa ra các thông số đầu vào của mô phỏng DEM được thực hiện trong nghiên cứu này (kết hợp với các thông số cơ lý tính của quả mận như đã trình bày ở bảng 1). Việc thiết kế và chia lưới phần tử hữu hạn cho chi tiết máy được thực hiện trên phần mềm Trelis, Sandia National Laboratory. Hình 3 thể hiện lưới phần tử hữu hạn các chi tiết máy để thực hiện mô phỏng.

Các mô phỏng DEM được thực hiện trên máy tính hiệu năng cao 64 Gb RAM, 32 nhân, 64 luồng, trong khi kết quả được xử lý trên Matlab R2018.

Bảng 2. Các thông số đầu vào của mô phỏng phần tử rời rạc

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Mô hình tiếp xúc	Ma sát trượt: Hertz-Mindlin	
	Ma sát lăn: tiêu chuẩn	
	Bám dính: không	
Gia tốc trọng trường	9,81	m/s ²
Hình dạng hạt	Hình cầu	
Đường kính hạt nhỏ nhất	20	mm
Đường kính hạt lớn nhất	65	mm
Biểu đồ phân bố đường kính hạt	Phân phối đều liên tục từ nhỏ nhất tới lớn nhất	
Bước thời gian	1,08e-5	s
Tổng thời gian mô phỏng thực tế	550	s
Tổng khối lượng củ quả nông sản phân loại	1000	kg
Tổng số hạt ước tính	8000	
Lưu lượng đầu vào thiết bị phân loại	2	kg/s
Lưu lượng đầu vào thiết bị phân loại	7,2	tấn/giờ
Dạng chia lưới cho chi tiết máy	tam giác (định dạng tệp STL)	
Số lượng phần tử	3609	
Diện tích phần tử trung bình	9,72	mm ²
Góc nhỏ của phần tử trung bình	21,23	°
Tỷ lệ cạnh phần tử trung bình	6,62	



Hình 3. Lưới phần tử hữu hạn các chi tiết máy để thực hiện mô phỏng

3.2. Ma trận các trường hợp mô phỏng

Trong nghiên cứu này, nhằm tối ưu thiết kế góc nghiêng β và thông số vận hành của thiết bị, ma trận mô phỏng sau đã được đề xuất như trình bày ở bảng 3. Các trường hợp mô phỏng này sẽ giúp đánh giá các tiêu chí sau:

- Khả năng di chuyển của hạt dọc theo chiều dài của lồng quay từ đầu vào tới đầu ra (các trường hợp SimNr0, SimNr3, SimNr4)
- Khả năng phân loại của lồng theo các kích thước định trước.

Bảng 3. Ma trận mô phỏng và các thông số tương ứng

Ký hiệu	Năng suất (tấn/giờ)	Góc nghiêng β (°)	Vận tốc góc lồng quay ω (vòng/phút)	Thời gian mô phỏng máy tính (giờ)	Số luồng tính toán
SimNr0	7,2	0°	25	45	12
SimNr1	7,2	5°	12,5	45	12
SimNr2	7,2	12°	12,5	45	12
SimNr3	7,2	5°	25	45	12
SimNr4	7,2	12°	25	45	12
SimNr5	7,2	5°	50	45	12
SimNr6	7,2	12°	50	45	12

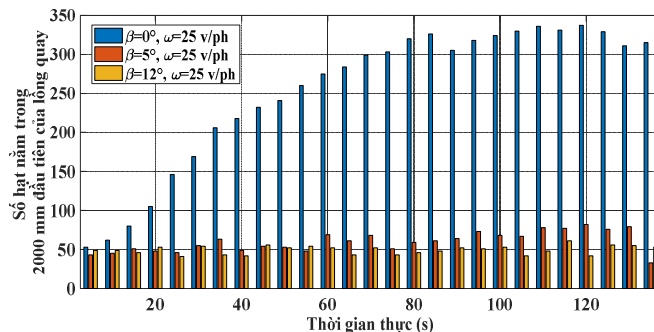
3.3. Kết quả tối ưu thiết kế và thông số vận hành

Hình 4 cho kết quả số lượng hạt nằm trong 2000mm đầu tiên (2 khoang đầu tiên) của lồng quay, với 3 trường hợp xem xét của góc nghiêng β là 0°, 5° và 12°. Cần chú ý rằng đối với cả ba trường hợp mô phỏng này, vận tốc góc của lồng quay đều bằng nhau và bằng 25v/ph. Có thể nhận thấy ở hình 4 rằng đối với trường hợp góc nghiêng $\beta = 0^\circ$, khả năng di chuyển dọc theo lồng quay của các quả mận là rất kém. Với thời gian từ 0s tới 80s đã có khoảng 300 quả mận bị kẹt lại/dồn ứ lại trong 2 khoang phân loại đầu tiên mà đáng ra chúng phải được di chuyển tới các khoang tiếp theo để phân loại. Con số này lớn hơn rất nhiều so với lồng quay dạng thanh xiên chéo $\beta = 5^\circ$ và 12° , khi chỉ có khoảng trên dưới 50 quả. Có thể nhận thấy rằng góc nghiêng $\beta = 12^\circ$ cho khả năng di chuyển dọc trục lồng của hạt tốt hơn so với $\beta = 5^\circ$, tuy nhiên con số chênh lệch là không đáng kể. Hơn nữa, khi góc $\beta = 5^\circ$ và 12° thì số hạt trong 2000mm đầu tiên gần như là hằng số, trong khi lưu lượng vẫn là 2kg/s, điều đó chứng tỏ khả năng di chuyển của các hạt từ đầu vào tới đầu ra của lồng quay là rất tốt. Như vậy, có thể kết luận để các quả mận có thể di chuyển liên tục từ đầu vào tới đầu ra, thì góc nghiêng β cần khác không. Do đó, chỉ duy nhất một trường hợp mô phỏng với góc nghiêng $\beta = 0^\circ$ đã được thực hiện. Hơn nữa, cần chú ý rằng hướng nghiêng này cần thuận theo chiều quay lồng để đưa hạt di chuyển về phía trước.

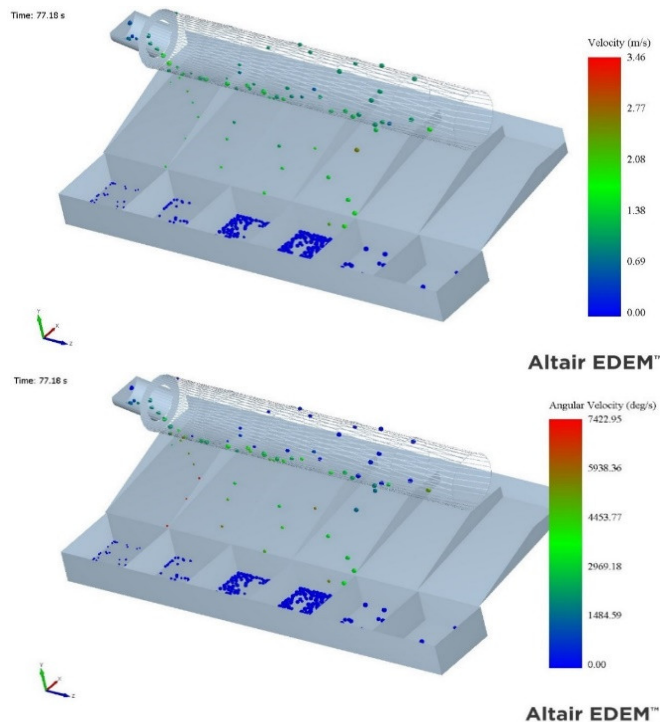
Hình 5 thể hiện vận tốc dài và vận tốc góc của các quả mận trong quá trình phân loại tại thời điểm $t = 77s$. Có thể nhận thấy ở hình 5 rằng vận tốc dài của các quả mận có thể đạt tới 3,5m/s, còn vận tốc góc của các quả mận có thể đạt tới 7422°/s.

Hình 6 thể hiện biểu đồ phân bố kích thước của từng khay chứa tại thời điểm $t = 550s$ (đã thực hiện phân loại 1 tấn mận, với năng suất 7,2 tấn/giờ), với 6 trường hợp mô phỏng như trình bày ở bảng 3. Đối với SimNr1 và SimNr2, vận tốc vòng quay là thấp. Đối với SimNr3 và SimNr4, vận tốc vòng quay là trung bình. Và đối với SimNr5 và SimNr6, vận tốc vòng quay là cao. Có thể nhận thấy ở Hình 6 rằng khi vận tốc góc của lồng quay trung bình và lớn, thì khả năng phân loại ở các khoang thứ 3 trở đi là không tốt (đường kính lớn hơn 42mm). Có sự chổng chéo rất lớn về kích thước cần phân loại giữa các khoang này. Đặc biệt quan sát rất rõ ở SimNr5 và SimNr6, khi vận tốc góc của lồng quay là 50v/ph. Điều đáng

chú ý là các quả có kích thước nhỏ cũng đi tới cuối của lồng quay, nơi mà được thiết kế cho quả có kích thước lớn. Điều này có thể giải thích rằng do vận tốc góc lớn, các quả di chuyển nhanh hơn, và do đó va đập với nhau và với thành nhiều hơn, chiều dài khoảng 1000mm do đó là không đủ để các quả rơi xuống khe hở.

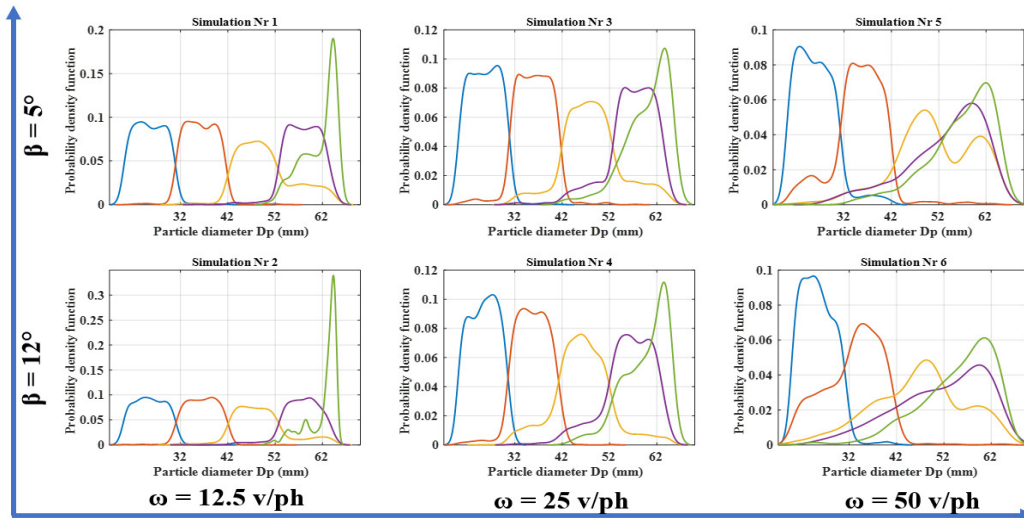


Hình 4. Khả năng di chuyển của hạt dọc theo chiều dài của lồng quay: số hạt nằm trong 2000mm đầu tiên của lồng quay với ba trường hợp của góc nghiêng β , thời gian từ 5 tới 135s

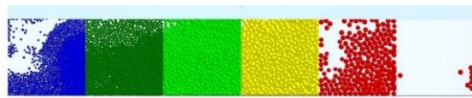


Hình 5. Hình ảnh vận tốc dài và vận tốc góc của các quả mận trong quá trình phân loại, SimNr3, $t = 77s$

Từ các quan sát định lượng này, có thể nhận thấy rằng trường hợp tối ưu nhất là SimNr2, với góc nghiêng $\beta = 12^\circ$ và vận tốc góc của lồng quay là 12,5v/ph. Trong trường hợp này, các khay chứa về cơ bản đã có các quả với kích thước mong muốn, với sai số là nhỏ nhất trong các trường hợp xem xét. Hình 7 thể hiện hình ảnh 5 khay chứa các quả mận sau quá trình mô phỏng phân loại với trường hợp SimNr2. Tuy nhiên, có thể nhận thấy rằng với góc nghiêng là 5° hay 12° thì sai số cũng không quá khác nhau. Thông số vận tốc góc của lồng quay có ảnh hưởng nhiều hơn tới khả năng làm việc của thiết bị.



Hình 6. Biểu đồ phân bố kích thước các quả mận trong từng khay chứa sau 550s thực tế, tổng khối lượng mận đã phân loại: 1 tấn. Các kích thước khe hở các khoang phân loại cũng được chỉ định (32, 42, 52, 62mm)



Altair EDEM™

Hình 7. Hình ảnh 5 khay chứa các quả mận sau quá trình mô phỏng phân loại với trường hợp SimNr2, t = 550s

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu này thực hiện các mô phỏng phần tử rời rạc nhằm trợ giúp tối ưu thiết kế và thông số vận hành thiết bị phân loại kích thước quả mận dạng lồng quay. Các kết luận chính của nghiên cứu như sau:

- Để các quả mận có thể di chuyển dễ dàng dọc theo lồng quay thì các thanh khung lồng được làm nghiêng theo chiều quay của lồng một góc là 12°;
- Đối với năng suất thiết kế 7,2 tấn/giờ, lồng có đường kính 800mm, có 5 khoang phân loại dài 1000 mm mỗi khoang, thì thông số vận hành tối ưu của thiết bị là 12,5v/ph cho vận tốc góc của lồng quay;
- Phương pháp mô phỏng phần tử rời rạc hoàn toàn có thể trợ giúp các kỹ sư/nghiên cứu viên trong việc tính toán thiết kế thông số vận hành của các thiết bị phân loại củ quả nông sản.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả cần thực hiện các nghiên cứu chuyên sâu hơn như phân loại các củ quả nông sản có hình dạng phức tạp. Hơn nữa, việc đo đạc các thông số cơ lý tính của củ quả nông sản là rất cần thiết vì đây là các thông số đầu vào của mô hình.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Altair HyperWorks for VietNam trong việc mô phỏng sử dụng phần mềm EDEM và sự hỗ trợ của Công ty H&B Bắc Ninh trong việc thực hiện thí nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Siddiq, *Tropical and Subtropical Fruits: Postharvest Physiology, Processing and Packaging*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2]. M. Van Zeebroeck, et al., "The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: Model building and validation of DEM to predict bruise damage of apples," *Postharvest Biol. Technol.*, 41, 1, 85–91, 2006. doi: 10.1016/j.postharvbio.2006.02.007.
- [3]. S. Romuli, S. Karaj, J. Müller, "Discrete element method simulation of the hulling process of *Jatropha curcas* L. fruits," *Biosyst. Eng.*, 155, 55–67, 2017. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.009.
- [4]. C. J. Coetzee, S. G. Lombard, "Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader," *Biosyst. Eng.*, 109, 4, 308–325, 2011.
- [5]. T.T. Le, "Investigation of force transmission, critical breakage force and relationship between micro-macroscopic behaviors of agricultural granular material in a uniaxial compaction test using discrete element method," *Part. Sci. Technol.*, 1–18, 2021. doi: 10.1080/02726351.2021.1983904.
- [6]. A. Esehaghbeygi, "Physical and Mechanical Properties of Three Plum Varieties", Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/57243926/Physical_and_Mechanical_Properties_of_Three_Plum_Varieties
- [7]. P. A. Cundall, O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Geotechnique*, 29, 1, 47–65, 1979. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
- [8]. J. Horabik and M. Molenda, "Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review," *Biosyst. Eng.*, 147, 206–225, 2016.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thi Hanh Nguyen¹, Le Tien Thinh², Nguyen Xuan Thiet¹, Le Minh Lu¹

¹Vietnam National University of Agriculture, Vietnam

²Phenikaa University, Vietnam