
基于计算流体分析与AHP-TOPSIS法的稻谷深床干燥机通风系统优化

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/34213.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

论文标题：Aeration system optimization for a deep bed dryer for paddy grain using computational fluid analysis and the AHP-TOPSIS method

期刊：Frontiers of Agricultural Science Engineering

作者：Diswandi NURBA, Sutrisno S. MARDJAN, Dyah WULANDANI, Leopold O. NELWAN, I Dewa Made SUBRATA

发表时间：15 Jun 2025

DOI：10.15302/J-FASE-2024577

微信链接：[点击此处阅读微信文章](#)

智慧农业

Smart Agriculture

专辑文章介绍

· 第九篇 ·

论文ID

Aeration system optimization for a deep bed dryer for paddy grain using computational fluid analysis and the AHP-TOPSIS method

基于计算流体分析与AHP-TOPSIS法的稻谷深床干燥机通风系统优化

文章类型：Research Article

发表年份：2025年

第一作者：Diswandi NURBA

通讯作者：Diswandi NURBA

Email: diswandinurba@usk.ac.id

作者单位：印度尼西亚茂物农业大学；赛亚瓜拉大学。

Cite this article :

Diswandi NURBA, Sutrisno S. MARDJAN, Dyah WULANDANI, Leopold O. NELWAN, I Dewa Made SUBRATA. Aeration system optimization for a deep bed dryer for paddy grain using computational fluid analysis and the AHP-TOPSIS method. *Front. Agr. Sci. Eng.*, 2025, 12(2): 308 – 322
<https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024577>

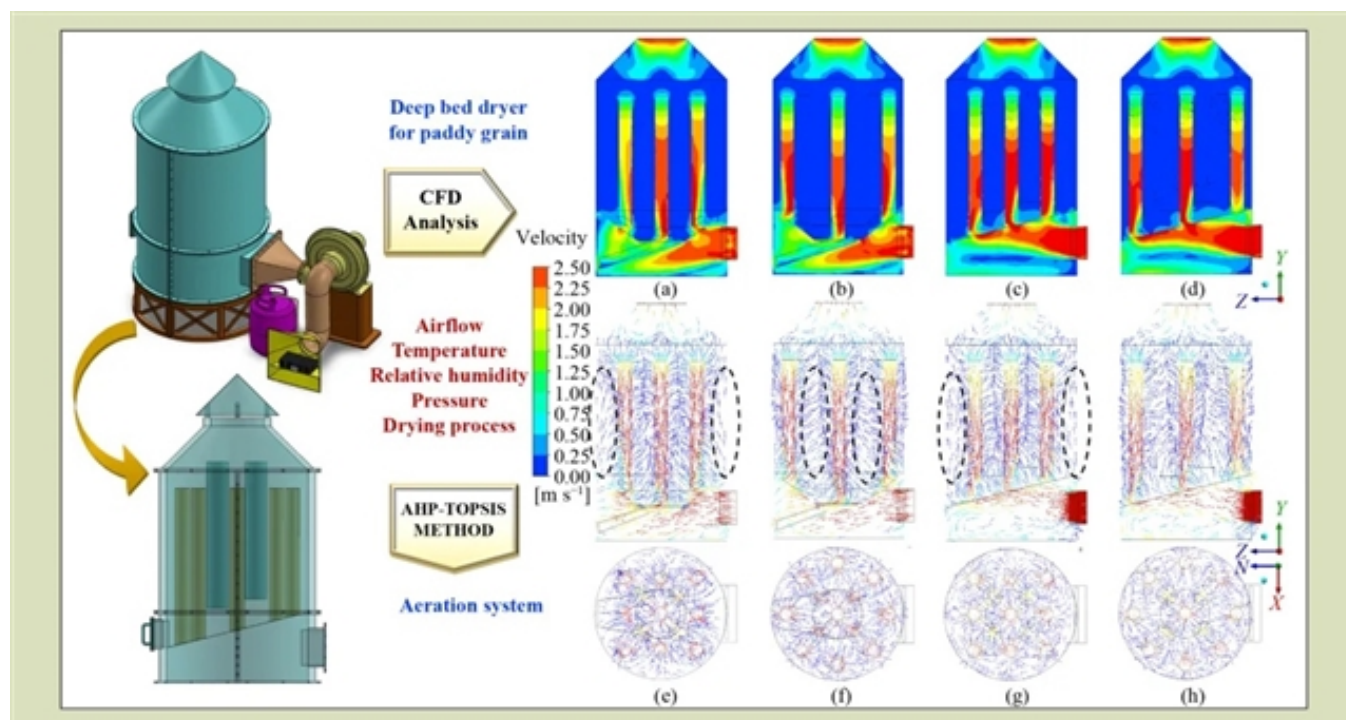
· 文章摘要 ·

在粮食安全背景下，干燥是稻谷收获后的关键处理环节，因其显著影响稻谷及大米品质。为降低干燥能耗，深床干燥机采用对流干燥方式，结合环境气流与辅助加热，以气流速度、温度和相对湿度 (RH) 作为核心干燥参数。因此需配置通风系统，使干燥空气穿透厚层稻谷堆并在干燥室内均匀分布。本研究基于计算流体动力学 (CFD) 与AHP-TOPSIS法，对四种干燥机通风系统模型开展气流速度、压力、温度及RH的定量可视化分析，并通过偏好值排序确定最优方案。结果表明：采用倾斜底板与圆形管道结构的模型4 (偏好值0.788) 为稻谷深床干燥机原型机的最优通风系统。

· 文章亮点 ·

1. 干燥作为稻谷收获后核心工序，直接影响稻谷与大米品质。
2. 深床干燥机属对流干燥设备，以气流/温度/相对湿度为核心干燥参数。
3. 通风系统保障干燥空气在干燥室内均匀分布。
4. 采用CFD与AHP-TOPSIS法确定最优通风系统。
5. 最优方案为配置倾斜底板及圆形管道结构的深床干燥机模型。

· Graphical abstract ·



· 研究内容 ·

引言

干燥是稻谷收获后决定品质的核心环节。新鲜稻谷含水率通常为22% – 30%，需在收获后12 – 24小时内迅速降至14%以下，以防止酶活性升高和真菌滋生导致品质劣变。干燥效率受初始含水率、干燥空气温度、相对湿度及气流速率等多重因素影响。其中，对流干燥技术凭借节能优势广泛应用于工业领域，其核心是通过<45

的热风传递热量与水分——该低温干燥工艺可避免米粒因高温产生裂纹，显著提升整精米率。

深床干燥作为对流干燥的典型应用，采用固定床层结构，利用气流穿透多孔介质实现热质传递。干燥过程中，稻谷堆内存在显著的含水率梯度：底层因直接接触干燥空气首先脱水，上层则因干燥空气携带的水蒸气迁移而经历短暂含水率上升。因此，通风系统的均匀性设计至关重要——需确保气流在稻谷堆内均匀分布，避免局部过干或过湿。

本研究构建了四种深床干燥机模型，核心差异在于底板形状与通风管道结构：

模型1 (CFRP：锥形底板 + 矩形管道)

模型2 (CFCP：锥形底板 + 圆形管道)

模型3 (SFRP：倾斜底板 + 矩形管道)

模型4 (SFCP：倾斜底板 + 圆形管道)

通过计算流体动力学 (CFD) 模拟不同工况下的气流速度、压力、温度和相对湿度分布 (设置三种输入气流速度水平), 结合层次分析法 (AHP) 与理想解法 (TOPSIS) 综合评估模型性能, 为高效节能干燥机设计提供了理论支撑。

研究结果分析

1. 气流特性分析

四种模型的干燥室气流模式呈现显著差异 (图1)。模型1因锥形底板与谷物卸料通道形成流动阻碍, 稳压室内流速降低, 空气入口和谷物出口上方的虚线标记区域显示气流覆盖薄弱。模型2虽采用圆形管道改善流动分布, 但输入管道之间仍存在局部弱气流区。模型3的倾斜底板消除了稳压室障碍, 气流自由扩散, 但矩形管道导致入口顶部区域流动覆盖不足。模型4则完全消除了弱气流区, 实现了全区域均匀分布。

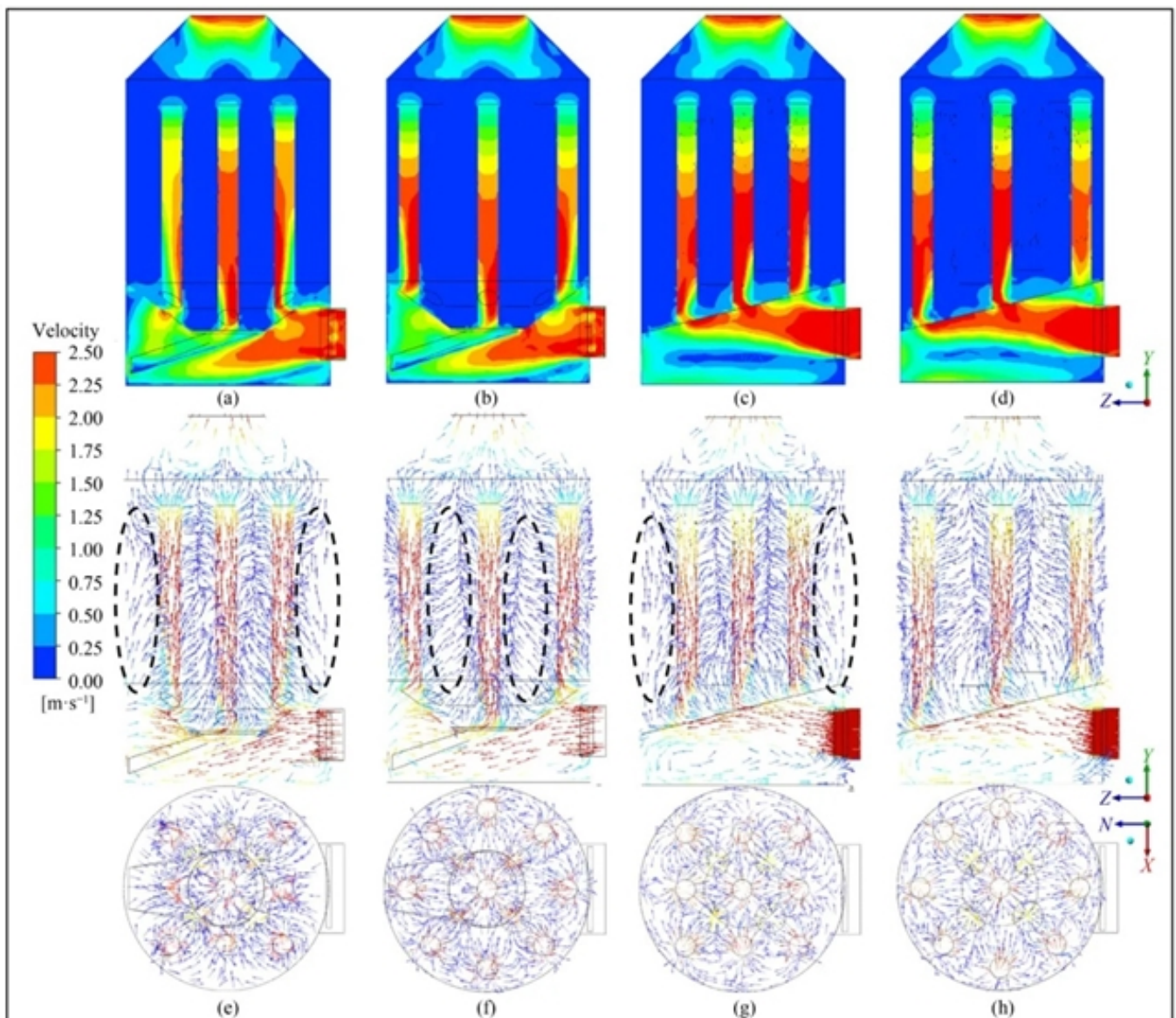


图1 输入风速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 深床干燥机各模型的气流速度及垂直/水平面矢量: (a) 模型1, (b) 模型2, (c) 模型3, (d) 模型4; (e) 模型1, (f) 模型2, (g) 模型3, (h)

模型4的垂直/水平面气流矢量图。

在气流速度量化分析中，干燥室内速度范围为 $0.007 - 0.597 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。低速输入时，模型3的气流速度标准偏差最小（ $0.057 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ），均匀性最佳；高速输入时，模型4的标准偏差为 $0.087 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其流速随输入强度呈现线性增长趋势（图2），响应梯度最大，表明通风系统对输入气流的调控效率更高。

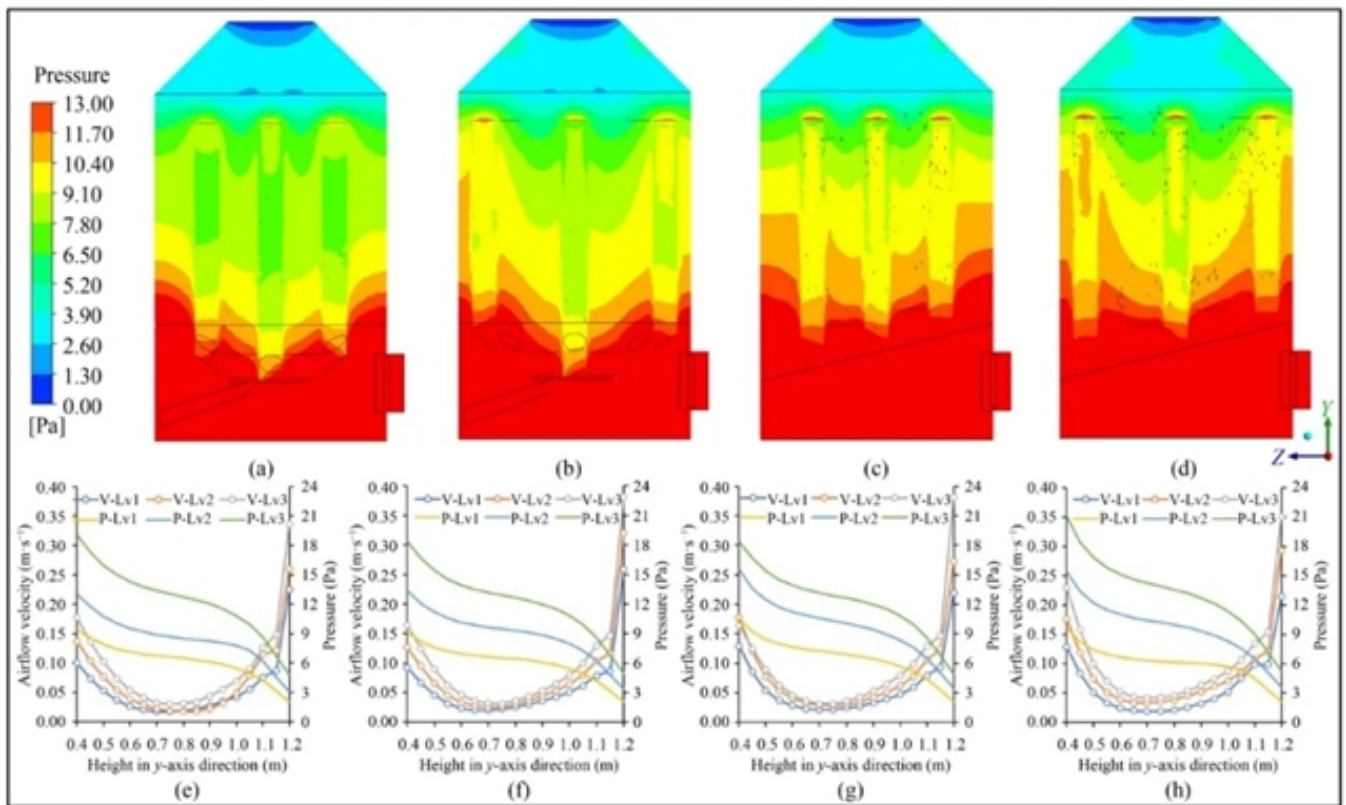


图2 输入风速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，深床干燥机各模型的压力等高线：(a) 模型1，(b) 模型2，(c) 模型3，(d) 模型4；三种输入风速下干燥室内速度和压力随高度变化：(e) 模型1，(f) 模型2，(g) 模型3，(h) 模型4。

2. 压力分布特性

气流压力分布受底板形状与管道结构的双重影响。倾斜底板设计（模型3、4）的压力分布均匀性显著优于锥形底板（模型1、2），穿过多孔底板后压力衰减更为平缓，等高线图中红色高压区域覆盖范围更广。圆形管道结构（模型2、4）通过径向挤压气流，实现了水平方向的均匀扩散；而矩形管道（模型1、3）则在管道与壁面交界处形成局部高压区，导致压力分布不均。

关键数据显示，干燥室平均压力随输入速度提升而增加：低速输入时为 7.6 Pa ，中速为 11.0 Pa ，高速达到 14.2 Pa 。低速条件下，模型4的压力标准偏差最小（ 1.76 Pa ），分布最为均匀；高速输入时其波动最大（ 3.93 Pa ），但响应梯度表明该模型对气流变化的适应性最强。

3. 温度与湿度动态响应

温度分布特性 (图3)

显示，模型3和4因倾斜底板与圆形管道设计，温度分布稳定性显著提升：干燥室底部高温区(红色)集中，中上层以黄绿色为主，温差控制在2

以内。相比之下，模型1和2呈现剧烈波动，干燥室中部出现带状高温区(红色)，边缘区域温度骤降(绿色)。规律分析表明，输入气流每增加 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，干燥室平均温度降低 0.63 。

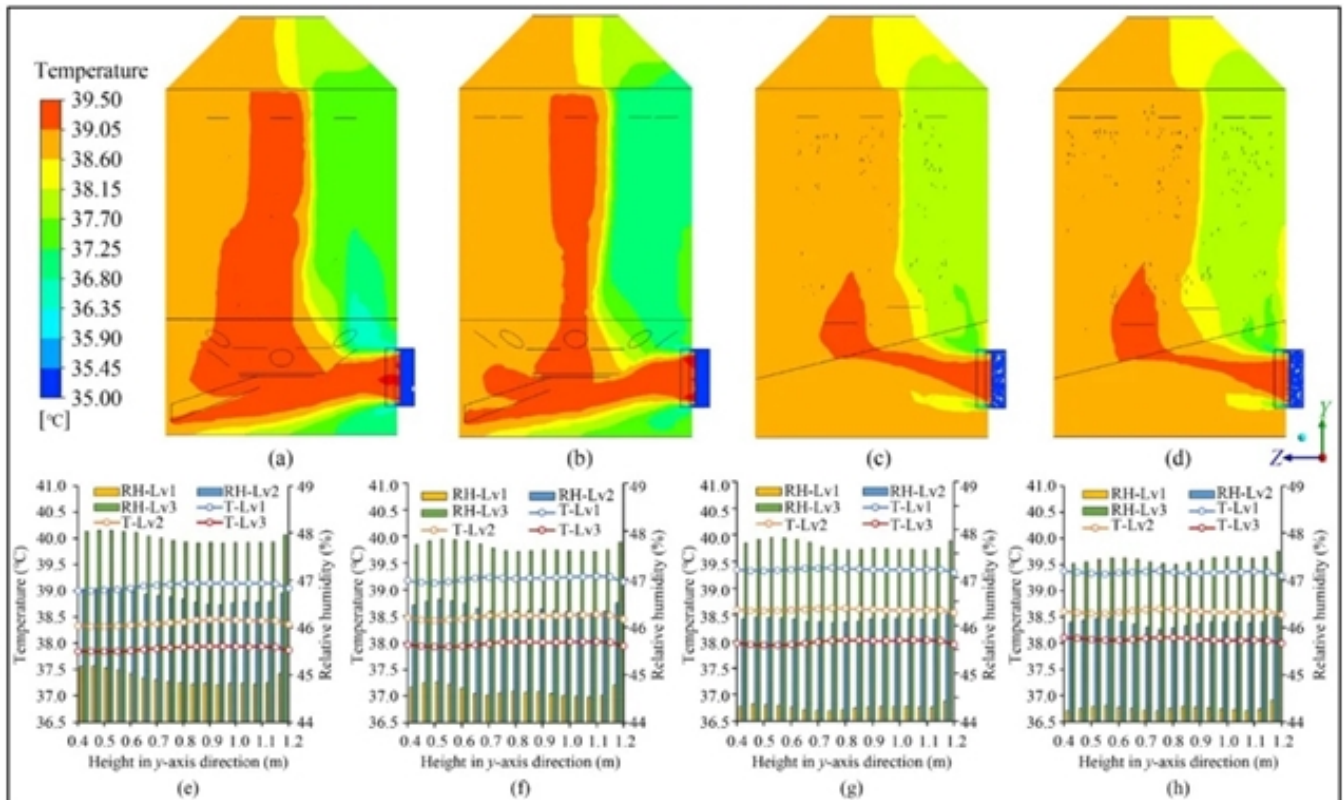


图3 输入风速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，深床干燥机各模型的温度等高线：(a) 模型1，(b) 模型2，(c) 模型3，(d) 模型4；三种输入风速下干燥室内温度和相对湿度随高度变化：(e) 模型1，(f) 模型2，(g) 模型3，(h) 模型4。

相对湿度分布与温度呈负相关。模型4的湿度均匀性最佳（标准偏差 $0.85\% - 0.91\%$ ），模型2波动最大。输入气流每增加 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，相对湿度上升 1.56% 。模型4的高温低湿环境可加速水分蒸发，但需通过动态调控避免过度干燥导致米粒裂纹。

4. 干燥过程动力学

干燥模拟结果(图4)揭示了不同模型的脱水效率差异。模型1(锥形底板+矩形管道)中，底层(40 cm)因直接接触气流，含水率下降最快，但上层(53–107 cm)梯度显著，平均干燥速率仅为每小时 1.91% ，最终含水率达 15.5% 。模型3(倾斜底板+矩形管道)虽通过倾斜底板改善了稳压室气流，但矩形管道限制了上层的均匀性，平均干燥速率每小时 1.88% ，含水率 15.6% 。

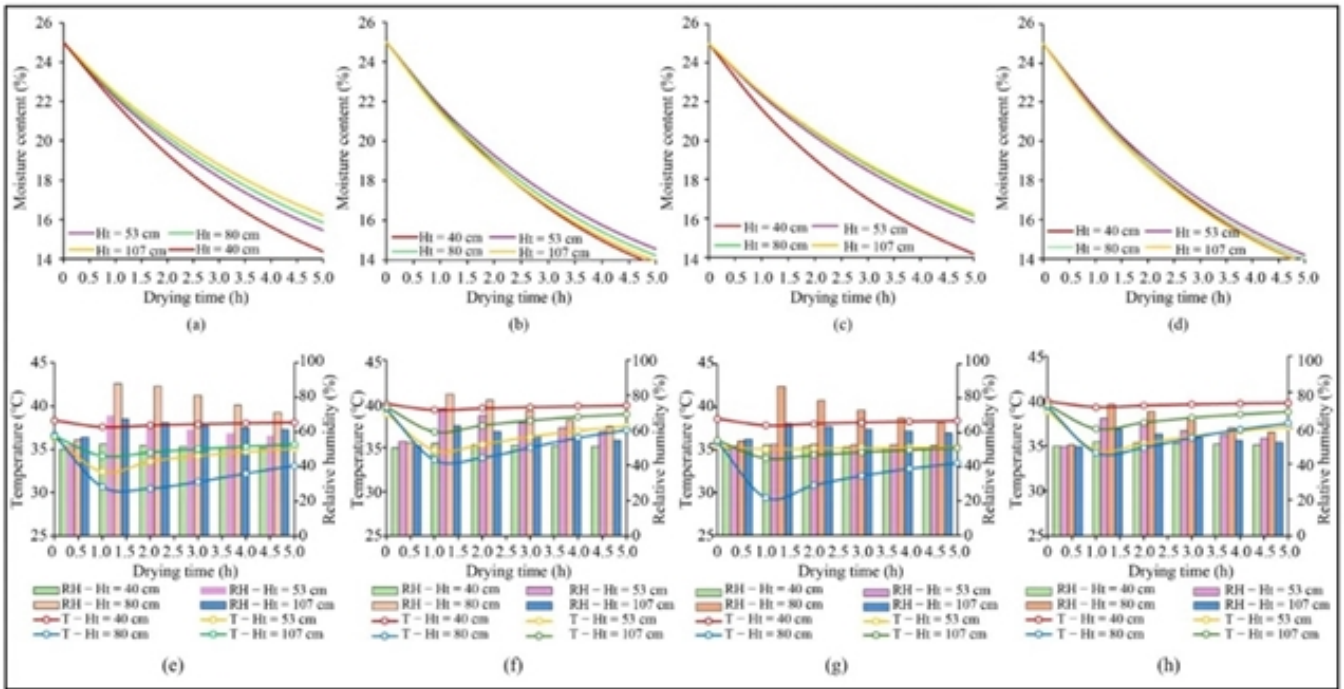


图4 输入风速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，深床干燥机各模型的温度等高线：(a) 模型1，(b) 模型2，(c) 模型3，(d) 模型4；三种输入风速下干燥室内温度和相对湿度随高度变化：(e) 模型1，(f) 模型2，(g) 模型3，(h) 模型4。

模型2(锥形底板+圆形管道)因圆形管道提升了分布效率，干燥速率提高至每小时2.18%，含水率降至14.1%，但锥形底板仍对气流形成机械阻碍。模型4(倾斜底板+圆形管道)表现最优：各层含水率同步下降，层间梯度极小，干燥速率达每小时2.22%，5小时内含水率稳定降至13.9%，且无冷凝风险。其成功机制在于：倾斜底板消除了稳压室流动障碍，使气流充分混合；圆形管道则实现了水平与垂直方向的均匀供气，避免局部湿气积聚。

· 结论 ·

本研究通过CFD模拟与AHP-TOPSIS方法，系统评估了四种深床干燥机通风系统性能，得出以下结论：

- (1) 倾斜底板+圆形管道(模型4)组合实现了气流、压力、温湿度的最佳均匀性，干燥速率最高(每小时2.22%)，5小时内可将含水率降至13.9%，满足安全储存要求。
- (2) AHP-TOPSIS组合方法有效整合定量与定性指标，避免了单一模拟的主观性，为通风系统优化提供了科学框架。
- (3) 模型4的设计适用于稻谷深床干燥机开发，后续需通过物理实验验证模拟结果，并开发气流-温度协同控制算法，以适应不同环境条件。

由教育部主管、高等教育出版社主办的《前沿》（Frontiers）系列英文学术期刊，于2006年正式创刊，以网络版和印刷版向全球发行。系列期刊包括基础科学、生命科学、工程技术和人文社会科学四个主题，是我国覆盖学科最广泛的英文学术期刊群，其中12种被SCI收录，其他也被A&HCI、Ei、MEDLINE或相应学科国际权威检索系统收录，具有一定的国际学术影响力。系列期刊采用在线优先出版方式，保证文章以最快速度发表。

中国学术前沿期刊网

<http://journal.hep.com.cn>

A promotional banner for Frontiers Journals. On the left, there is a circular collage of various journal covers from the series, including titles like 'Frontiers in Physics', 'Frontiers in Chemistry', 'Frontiers in Optics', 'Frontiers in Agricultural Science', 'Frontiers in Mathematics', 'Frontiers in Medicine', 'Frontiers in Computer Science', 'Frontiers in Materials', 'Frontiers in Energy', 'Frontiers in Environmental Science', 'Frontiers in Earth Science', 'Frontiers in Space Science', 'Frontiers in Planetary Science', 'Frontiers in Oceanography', 'Frontiers in Marine Science', 'Frontiers in Atmospheric Science', 'Frontiers in Geophysics', 'Frontiers in Earthquake Engineering', 'Frontiers in Structural Engineering', 'Frontiers in Civil Engineering', 'Frontiers in Mechanical Engineering', 'Frontiers in Electrical Engineering', 'Frontiers in Chemical Engineering', 'Frontiers in Biomedical Engineering', 'Frontiers in Nanotechnology', 'Frontiers in Materials Science', 'Frontiers in Applied Physics', 'Frontiers in Applied Mathematics', 'Frontiers in Applied Chemistry', 'Frontiers in Applied Biology', 'Frontiers in Applied Geology', 'Frontiers in Applied Earth Science', 'Frontiers in Applied Oceanography', 'Frontiers in Applied Marine Science', 'Frontiers in Applied Atmospheric Science', 'Frontiers in Applied Geophysics', 'Frontiers in Applied Earthquake Engineering', 'Frontiers in Applied Structural Engineering', 'Frontiers in Applied Civil Engineering', 'Frontiers in Applied Mechanical Engineering', 'Frontiers in Applied Electrical Engineering', 'Frontiers in Applied Chemical Engineering', 'Frontiers in Applied Biomedical Engineering', 'Frontiers in Applied Nanotechnology', 'Frontiers in Applied Materials Science', 'Frontiers in Applied Applied Physics', 'Frontiers in Applied Applied Mathematics', 'Frontiers in Applied Applied Chemistry', 'Frontiers in Applied Applied Biology', 'Frontiers in Applied Applied Geology', 'Frontiers in Applied Applied Earth Science', 'Frontiers in Applied Applied Oceanography', 'Frontiers in Applied Applied Marine Science', 'Frontiers in Applied Applied Atmospheric Science', 'Frontiers in Applied Applied Geophysics', 'Frontiers in Applied Applied Earthquake Engineering', 'Frontiers in Applied Applied Structural Engineering', 'Frontiers in Applied Applied Civil Engineering', 'Frontiers in Applied Applied Mechanical Engineering', 'Frontiers in Applied Applied Electrical Engineering', 'Frontiers in Applied Applied Chemical Engineering', 'Frontiers in Applied Applied Biomedical Engineering', 'Frontiers in Applied Applied Nanotechnology', 'Frontiers in Applied Applied Materials Science'. In the center, there is a QR code. To the right of the QR code, the text 'Content available online' is written in red, followed by the URL 'http://journal.hep.com.cn' in black. On the far right, the title 'Frontiers Journals' is written in a large, bold, orange font. Below the title, there is a list of bullet points: 'Covering the fields of natural sciences, engineering, life sciences and social sciences & humanities', 'Indexed by SCI, A&HCI, Ei, MEDLINE, Scopus, etc.', 'Worldwide available', 'Online first publishing', and 'Co-published by Springer, etc.' The background of the banner is a light blue sky with white clouds.

高等教育出版社

Frontiers Journals

- Covering the fields of natural sciences, engineering, life sciences and social sciences & humanities
- Indexed by SCI, A&HCI, Ei, MEDLINE, Scopus, etc.
- Worldwide available
- Online first publishing
- Co-published by Springer, etc.

Content available online
<http://journal.hep.com.cn>

来源：Frontiers of Agricultural Science & Engineering

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发