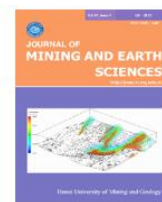




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Effects of meteorological conditions on the air quality in deep open - pit mines in Vietnam



Nam Xuan Bui ^{1,2,*}, Hoang Nguyen ^{1,2}, Changwoo Lee ³, Thao Qui Le ^{1,2}, Tuyen Van Bui ^{4,*}

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Center for Mining, Electro - Mechanical Research, Hanoi, Vietnam

³ College of Engineering, Dong - A University, Busan, Korea

⁴ Hanoi Department of Industry and Trade, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 15th Apr. 2021

Revised 23rd July 2021

Accepted 09th Aug. 2021

Keywords:

Air quality,
Deep open - pit mine,
Meteorological condition,
Simulation.

Air quality in open - pit mines is the big concern relating to the occupational safety and healthy, as well as the surrounding environment. In the past years, management of the air quality in open - pit mines is challenge due to the limit of science and technology in the assessment of the effects of meteorological conditions and toxics in open - pit mines. Therefore, this study assessed the effects of meteorological conditions on the air quality in deep open - pit mines. The air velocity distribution and the dispersal mechanism of the air quality were evaluated at the Coc Sau open - pit coal mine (Vietnam) based on the measured and simulated datasets. Two fixed stations were set up in the ground to monitor the wind direction, wind speed and the temperature to evaluate the stable of the actual ozone layer based on the Pasquill ozone layer. The datasets were also used to analysis and 3D simulate to understand the air pollution mechanism in the Coc Sau open - pit coal mine. On the other hand, the change of the temperature in vertical was measured to determine the to determine the existence of a temperature inversion layer. It is considered as the main reason for the air quality reduction and the natural air circulation in deep open - pit mines. The findings indicated the existence of the temperature inversion layer and they are useful for proposing the artificial ventilation in deep open - pit mine, aiming to improve the air quality in open - pit mines. The 3D simulations also revealed that the high dust and gas concentrations in open - pit mines are due to the stable of the ozone layer.

Copyright © 2021 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: buixuannam@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(4).01



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Ảnh hưởng của điều kiện khí tượng tới chất lượng không khí tại các mỏ lộ thiên sâu Việt Nam

Bùi Xuân Nam ^{1,2,*}, Nguyễn Hoàng ^{1,2}, Changwoo Lee ³, Lê Quý Thảo ^{1,2}, Bùi Văn Tuyên ⁴

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Trung tâm Nghiên cứu Cơ Điện Mỏ, Hà Nội, Việt Nam

³ Trường Cao đẳng Kỹ thuật, Đại học Đông A, Busan, Hàn Quốc

⁴ Sở Công thương Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 15/4/2021

Sửa xong 23/7/2021

Chap nhận đăng 09/8/2021

Từ khóa:

Chất lượng không khí,

Điều kiện khí tượng,

Mỏ lộ thiên sâu,

Mô phỏng.

TÓM TẮT

Chất lượng không khí trong khai thác mỏ là một mối quan tâm đặc biệt, có liên quan nhiều đến sức khỏe nghề nghiệp và cộng đồng. Việc quản lý chất lượng không khí ở các khu vực khai thác đang gặp nhiều khó khăn do các hạn chế về cơ sở khoa học và các giải pháp khoa học - công nghệ trong việc đánh giá ảnh hưởng của điều kiện khí tượng cũng như đã loại bỏ cơ chế vật lý các chất gây ô nhiễm không khí trong các mỏ lộ thiên. Do đó, nghiên cứu này đã đánh giá ảnh hưởng của điều kiện khí tượng tới chất lượng không khí tại các mỏ lộ thiên sâu. Sự phân bố vận tốc không khí và cơ chế phân tán khí đã được đánh giá ở mỏ than lộ thiên sâu nhất Việt Nam (mỏ than Cọc Sáu - Quảng Ninh) dựa trên số liệu quan trắc và mô phỏng. Hai trạm quan trắc cố định được lắp đặt ở mặt đất để đo tốc độ gió, hướng gió và nhiệt độ nhằm đánh giá độ ổn định của lớp khí quyển dựa trên lớp ổn định khí quyển Pasquill. Các dữ liệu giám sát này cũng được sử dụng để phân tích 3D mô phỏng về cơ chế phân tán khí ô nhiễm. Mặt khác, sự thay đổi nhiệt độ theo phương thẳng đứng trong mỏ được đo để xác định sự tồn tại của lớp nghịch đảo nhiệt độ. Kết quả của nghiên cứu này cho thấy sự tồn tại của lớp nghịch đảo nhiệt độ bằng kết quả thí nghiệm là cơ sở để xem xét và đề xuất các giải pháp thông gió cơ học (nhân tạo) nhằm nâng cao chất lượng không khí tại các mỏ lộ thiên sâu. Mô phỏng sự phát tán không khí theo mô hình 3D thực tế của mỏ về sự phân bố vận tốc không khí và cơ chế phân tán khí CO đã chỉ ra rằng nồng độ bụi và khí cao trong mỏ một phần là do sự ổn định của khí quyển.

© 2021 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: buixuannam@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(4).01

1. Mở đầu

Khai thác mỏ là một trong những ngành công nghiệp quan trọng, góp phần không nhỏ trong sự nghiệp công nghiệp hóa - hiện đại hóa đất nước. Tuy nhiên, do nhu cầu ngày càng cao về tiêu thụ

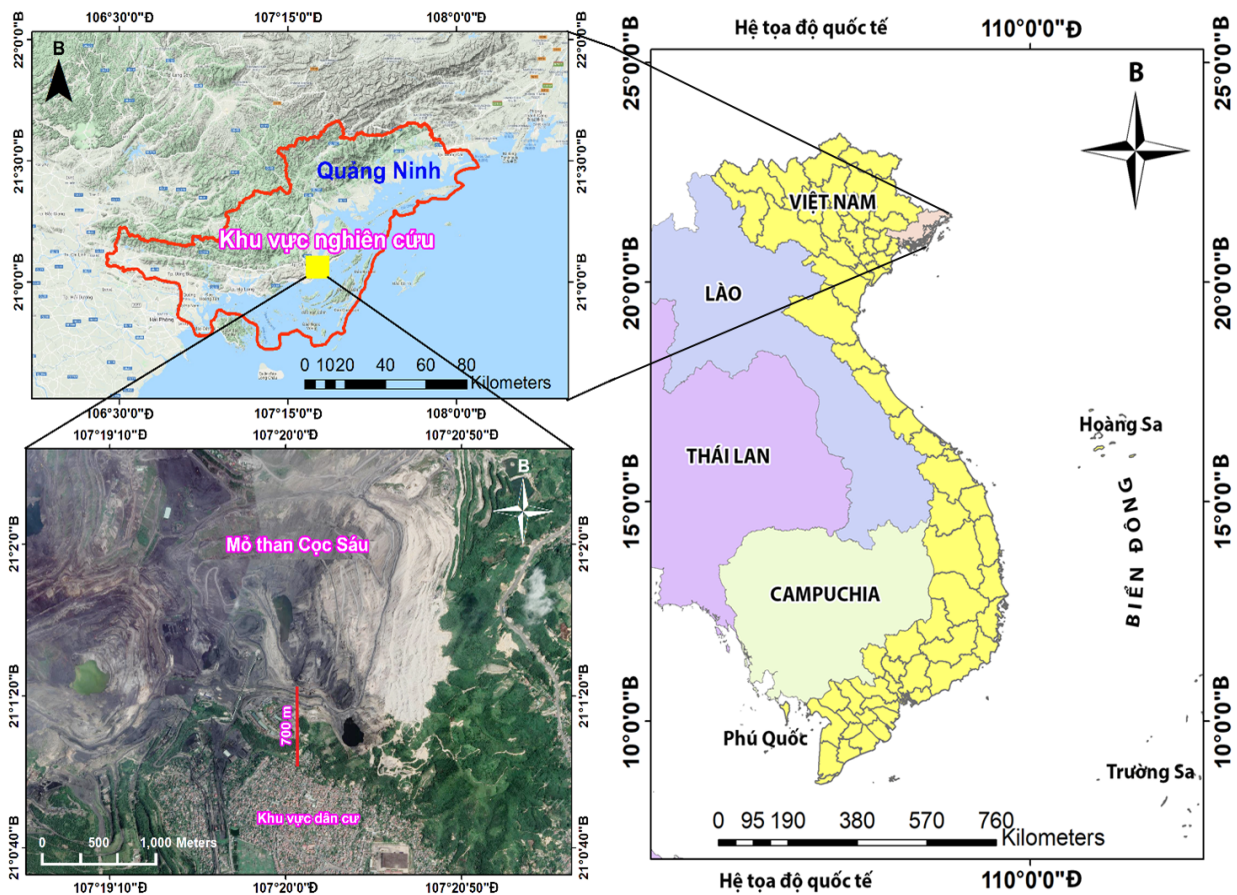
than trong và ngoài nước, các mỏ lộ thiên Việt Nam đã phải nâng công suất, khai thác xuống sâu. Một cách trực tiếp hoặc gián tiếp, các hoạt động khai thác tại các mỏ này đã và đang góp phần gây ra các vấn đề ô nhiễm không khí và tiềm ẩn nhiều mối nguy hiểm liên quan đến sức khỏe nghề nghiệp (Zunaira Asif, Zhi Chen, 2016). Sự tập trung phát triển vào các hoạt động khai thác lộ thiên trong những năm gần đây nhằm đạt được các mục tiêu sản xuất ngày càng tăng đã làm trầm trọng thêm vấn đề ô nhiễm không khí (Partha Sarathi Panda, Rajat Sahu, 2013). Hoạt động khai thác than là nguyên nhân tạo ra ô nhiễm không khí và sự phân tán là mối quan tâm hàng đầu đối với chất lượng không khí xung quanh trong các hố sâu như mỏ lộ thiên. Cơ chế phân tán không khí bao gồm quá trình khuếch tán và đối lưu. Các chuyển động trong khí quyển vận chuyển và khuếch tán các chất ô nhiễm thải ra từ các nguồn trong các khâu công nghệ chính của khai thác lộ thiên như: khoan - nổ mìn, xúc bốc, vận tải,... Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để tìm hiểu các cơ chế vận chuyển và khuếch tán của không khí trong mỏ lộ thiên. Phương pháp theo dõi khí được Richardson sử dụng để khảo sát các đặc tính phân tán (Lewis Fry Richardson, 1926). Các quy mô chuyển động theo thời gian và không gian giúp phân tán các chất ô nhiễm trong khí quyển bằng cách trộn lẫn và do đó làm giảm nồng độ chất ô nhiễm xung quanh (D. Bruce Turner, 2020). Torben Mikkelsen, Morten Nielsen (2003) và S.R. Hanna, G.A. Briggs và nnk. (1982) đã thảo luận về các khía cạnh khác nhau của sự phân tán và các thông số liên quan bị ảnh hưởng chủ yếu bởi nguồn ô nhiễm, độ gồ ghề và địa hình xung quanh, độ ổn định của khí quyển và sự chênh lệch nhiệt độ. Các chất gây ô nhiễm không khí tiềm ẩn trong hoạt động khai thác mỏ là các chất ô nhiễm dạng hạt, bao gồm các hạt có đường kính khí động học tương đương nhỏ hơn 10 μm (PM10) và khí thải (CO, CO₂, SO₂, NO_x). Những nguồn gây ô nhiễm này tạo thành những mối quan tâm chính về môi trường. Đáng chú ý, các hoạt động khai thác tạo ra các nguồn ô nhiễm này là từ hoạt động của các khâu công nghệ khoan - nổ mìn, xúc bốc, vận chuyển và đổ thải. Các nguồn ô nhiễm làm giảm chất lượng không khí và ảnh hưởng xấu đến hệ động thực vật cũng như sức khỏe con người. Các khí và bụi này có thể được gió vận chuyển trên một quãng đường dài và sau đó lắng đọng trên đất

liền hoặc nước và gây ra tác hại về môi trường đối với các hệ sinh thái khác (L. Morawska và nnk., 2004).

Nghiên cứu này nhằm mục đích mô tả toàn diện các cơ chế phân tán trong các mỏ than lộ thiên sâu có xét đến các yếu tố địa hình, nhiệt và khí tượng dựa trên dữ liệu quan trắc và phân tích mô phỏng 3D. Sự ổn định của lớp khí quyển và lớp nghịch đảo nhiệt độ được thảo luận để hiểu cơ chế phân tán. Bên cạnh đó, để giúp hiểu rõ hơn về cơ chế phân tán khí, một mô hình quy mô đầy đủ 3D của mỏ lộ thiên được mô phỏng bằng công cụ CFD. CFD là phương pháp động lực học chất lỏng hoặc khí. Phương pháp này cho phép phân tích các trạng thái di chuyển các dòng chất lỏng hoặc khí trong không gian. Kết quả nghiên cứu này về độ ổn định của lớp khí quyển, lớp nghịch đảo nhiệt độ và phân tích CFD được kỳ vọng sẽ cung cấp thông tin quan trọng cho cơ chế phân tán chất ô nhiễm trong các mỏ than lộ thiên sâu. Kết quả này có thể được sử dụng như một phần thông tin hữu ích để đưa ra cảnh báo nâng cao về các vấn đề phát thải tiềm ẩn và cung cấp cơ sở cho việc lập kế hoạch trong tương lai trong việc khai thác sâu lộ thiên (Sumanth Chinthala, Mukesh Khare, 2011).

2. Khu vực nghiên cứu và phương pháp thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, mỏ than Cọc Sáu (Cẩm Phả - Quảng Ninh) là một trong những mỏ than lộ thiên sâu nhất Việt Nam được lựa chọn để đánh giá điều kiện khí tượng tại khu vực đáy mỏ và mặt mỏ. Vị trí địa lý, địa hình cũng như hiện trạng của mỏ được minh họa trong Hình 1. Mỏ than Cọc Sáu nằm ở phía đông bắc thành phố Cẩm Phả, phía tây bắc giáp mỏ than Cao Sơn, phía tây giáp mỏ than Đèo Nai, phía đông giáp khu Quảng Lợi và phía nam cách Quốc lộ 18A khoảng 2 km. Mỏ Cọc Sáu nằm trong khu vực có địa hình nguyên thủy khá cao với dãy núi Quảng Lợi ở phía đông có đỉnh cao trên 350 m. Phía tây là dãy núi kéo dài từ Đèo Nai sang với độ cao trên 150 m. Phía bắc và phía nam địa hình thấp hơn, độ cao địa hình ở đây cao từ 70÷100 m. Hiện nay, do quá trình khai thác lộ thiên, làm cho địa hình nguyên thủy bị biến đổi đang khai thác xuống sâu tới độ sâu -250 m tại moong Thắng Lợi tại thời điểm thực hiện nghiên cứu này hoàn toàn. Địa hình mỏ được thay thế bằng các moong, các tầng đất đá và các bãi thải,... đáy mỏ.



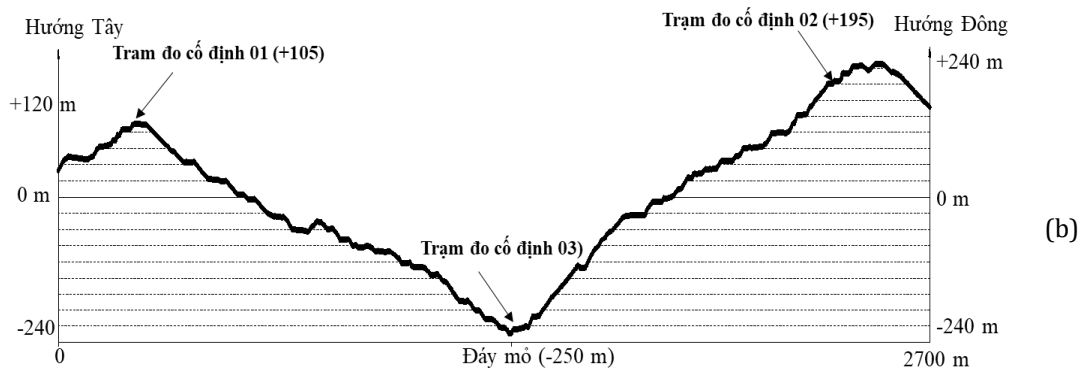
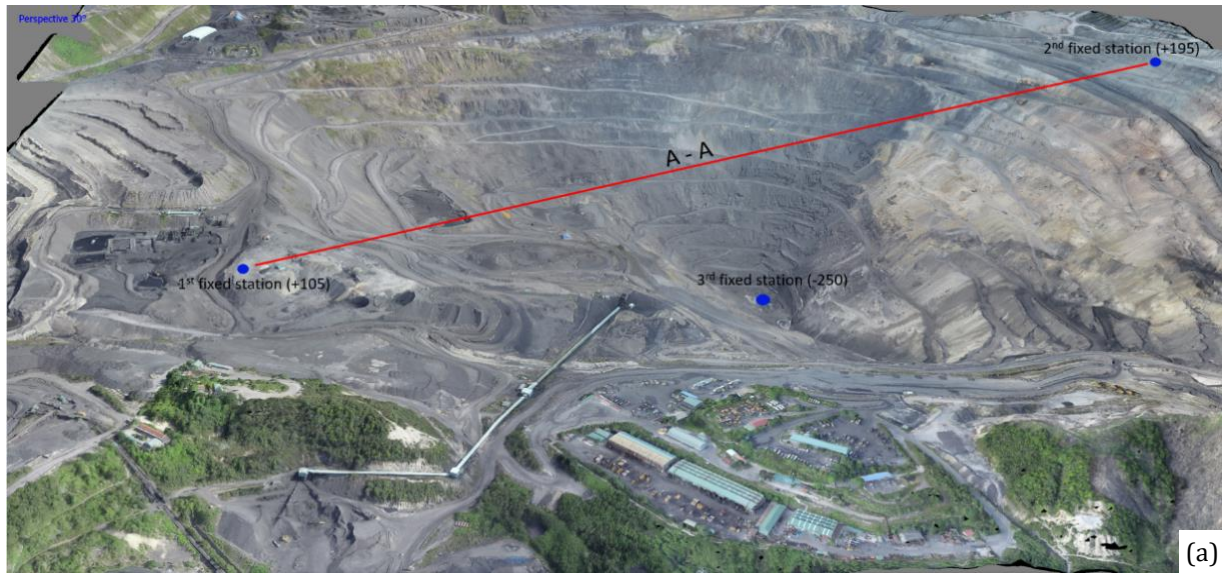
Hình 1. Vị trí mỏ than Cốc Sáu và khoảng cách tới khu vực dân cư lân cận.

Để thu thập dữ liệu khí tượng tại các khu vực đáy mỏ và mặt mỏ, phương pháp thực nghiệm đo đạc, lấy mẫu không khí đã được thực hiện. Theo đó, các trạm đo cố định và các trạm đo di động đã được thiết lập để thu thập điều kiện khí tượng tại các khu vực đáy mỏ và mặt mỏ. Trong đó, 3 trạm cố định được đặt tại đáy moong ở mức -250 m và mặt mỏ ở mức +195 m và mức +105 m. Thời gian thí nghiệm từ 18/5/2018 đến hết ngày 21/5/2018. Thời gian đo tại các trạm đo cố định là 24/7. Đối với trạm di động, các thiết bị quan trắc khí tượng như KANOMAX (Nhật Bản), nhiệt kế, ẩm kế đã được gắn trên ô tô và di chuyển từ đáy mỏ lên mặt mỏ và lặp lại chu trình từ mặt mỏ xuống đáy mỏ. Quá trình thu thập dữ liệu từ các trạm cố định được minh họa trong Hình 2.

Để thu thập dữ liệu, ba trạm quan trắc cố định đã được lắp đặt. Cụ thể, hai trạm quan trắc cố định được lắp đặt ở mặt đất để đo tốc độ gió, hướng gió và nhiệt độ để đánh giá độ ổn định của lớp khí quyển dựa trên lớp ổn định Pasquill. Ngoài ra, tại đáy hố đã lắp đặt trạm quan trắc cố định thứ ba để

đo nồng độ khí PM₁₀ và CO nhằm đánh giá sự phát tán của không khí ô nhiễm trong hố. Có thể thấy trong Hình 2 (a) và 2 (b), trạm quan trắc cố định đầu tiên được lắp đặt ở vị trí +105 m và trạm quan trắc cố định thứ hai ở +195 m. Về cảm biến giám sát, máy đo gió siêu âm Young 81000 (Yakunin A. G, 2017) được sử dụng để thu thập dữ liệu. Cảm biến là mô hình 3 trục, không có bộ phận chuyển động với cảm biến. Nó hoàn toàn phù hợp để đo tốc độ gió yêu cầu phản hồi nhanh, độ phân giải cao và đo gió ba chiều. Thiết bị Young 81000 có thể đo vận tốc gió ba chiều và tốc độ âm thanh dựa trên thời gian truyền của tín hiệu âm thanh siêu âm. Nhiệt độ âm có nguồn gốc từ tốc độ âm thanh, được hiệu chỉnh cho các hiệu ứng gió chéo. Chi tiết về thông số kỹ thuật của mô hình Young 81000 có thể được tìm thấy trong Bảng 1.

Như đã đề cập ở trên, để đánh giá sự phân tán không khí bị ô nhiễm (ví dụ, PM₁₀ và CO) trong mỏ, trạm quan trắc cố định thứ ba đã được lắp đặt ở đáy mỏ (-250 m).



Hình 2. Các trạm cố định thu thập điều kiện khí tượng cho mỏ than Cọc Sáu tại mức -250 m và +195 m.
(a) Trạm đo cố định tại mỏ than Cọc Sáu; (b) Mặt cắt 3 trạm đo cố định tại mỏ than Cọc Sáu.

Bảng 1. Đặc tính của cảm biến đo tốc độ gió và nhiệt độ tại các trạm đo cố định.

Đặc tính	Khoảng đo	Mức độ chính xác	Mức độ thấp nhất
Tốc độ gió (m/s)	0÷40	±0,05 m/s	0,01 m/s
Hướng gió (độ)	0÷360	±2÷5 độ	0,1 độ
Tốc độ âm thanh (m/s)	300÷360	±0,1%	0,01 m/s
Nhiệt độ (°C)	-50÷50	±2°C	0,01°C

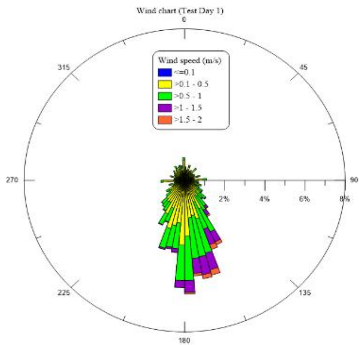
Quá trình thu thập dữ liệu, cũng như dữ liệu khí tượng của nghiên cứu này, được minh họa trong Hình 3 và dữ liệu thu thập trong 4 ngày được tóm tắt trong Bảng 2. Trong Hình 3 tốc độ gió khác nhau được thể hiện bằng các màu khác nhau. Trong đó, tốc độ gió thấp nhất được mô tả là màu

xanh đậm. Tốc độ gió lớn nhất là màu đỏ. Dựa trên kết quả đo có thể thấy tốc độ gió trung bình là màu xanh lá cây. Trong khí đó hướng gió được hiển thị theo độ của vòng tròn 360 độ.

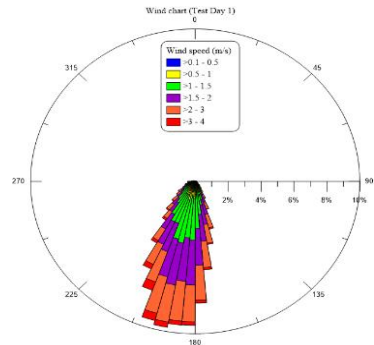
3. Lớp ổn định khí quyển và hiện tượng nghịch đảo nhiệt độ

3.1. Lớp ổn định khí quyển

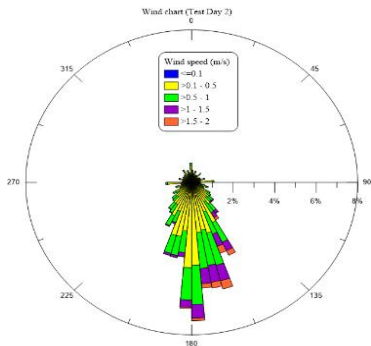
Hình 3 cho thấy biểu đồ gió của hai trạm cố định trên mặt đất trong 4 ngày thử nghiệm. Có thể thấy, tại trạm cố định đầu tiên ở mức (+105 m), gió chủ đạo thổi từ bắc vào nam trong suốt 4 ngày thử nghiệm. Tốc độ gió 0,16÷3,34 m/s đã được đo tại trạm này, như trong các Hình 3 (a), (c), (e) và (g). Tuy nhiên, tốc độ gió chủ yếu nằm trong khoảng 0,5÷1,0 m/s đối với trạm quan trắc cố định đầu tiên, như trong Hình 3.



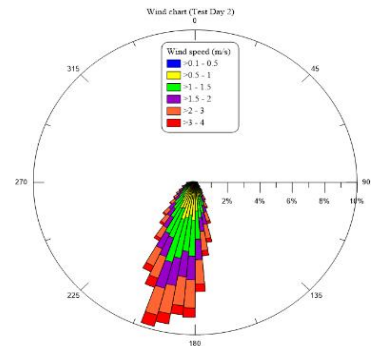
(a) Ngày 1 trạm đo số 1 (+105 m)



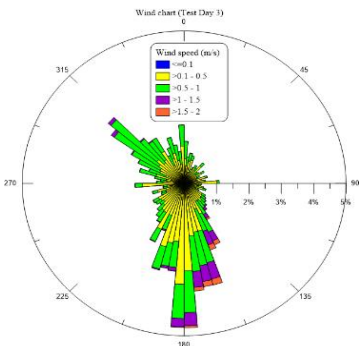
(b) Ngày 1 trạm đo số 2 (+195 m)



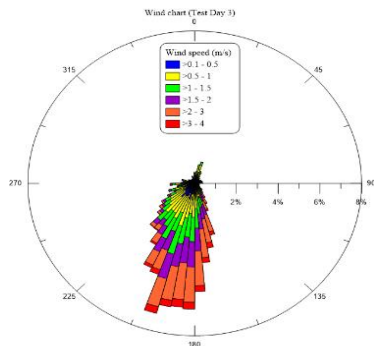
(c) Ngày 2 trạm đo số 1 (+105 m)



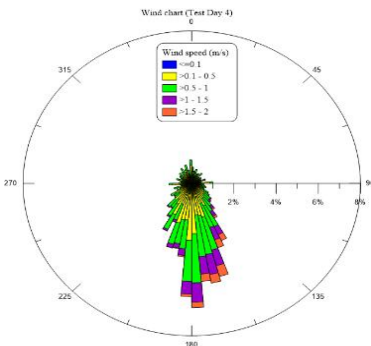
(d) Ngày 2 trạm đo số 2 (+195 m)



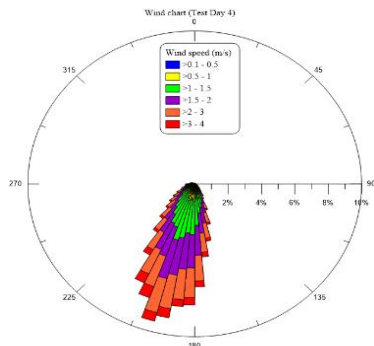
(e) Ngày 3 trạm đo số 1 (+105 m)



(f) Ngày 3 trạm đo số 2 (+195 m)



(g) Ngày 4 trạm đo số 1 (+105 m)



(h) Ngày 4 trạm đo số 2 (+195 m)

Hình 3. Biểu đồ tốc độ gió và hướng gió trong 4 ngày thí nghiệm tại hai trạm đo cố định trên mặt khu vực mỏ Cọc Sáu.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả thí nghiệm tại hai trạm đo cố định trên mặt mỏ.

Trạm đo	Thời gian thí nghiệm	Tốc độ gió theo phương U (m/s)			Nhiệt độ (°C)		
		Lớn nhất	Trung bình	Nhỏ nhất	Lớn nhất	Trung bình	Nhỏ nhất
Trạm đo số 1 (+105 m)	Ngày 1	1,20	0,30	-3,12	40,29	32,50	29,85
	Ngày 2	1,08	0,30	-3,27	40,65	31,97	29,61
	Ngày 3	1,21	0,16	-3,01	39,39	31,87	27,45
	Ngày 4	1,48	0,35	-3,34	39,31	32,50	29,95
Trạm đo số 2 (+195 m)	Ngày 1	1,21	-1,45	-4,50	33,01	30,01	28,83
	Ngày 2	1,68	-1,26	-5,41	34,89	30,36	28,61
	Ngày 3	1,61	-1,06	-4,67	36,17	30,57	26,99
	Ngày 4	2,28	-1,45	-5,85	35,23	30,29	29,05

Ở trạm cố định thứ hai ở độ cao +195 m, tốc độ gió cao hơn, dao động từ 1,06÷5,85 m/s. Ngoài ra, gió thổi từ đông bắc sang tây nam tại trạm cố định thứ hai (+195 m). Tất cả dữ liệu đo thu thập tại trạm cố định đầu tiên được sử dụng cho phân tích số và được thảo luận trong các phần sau.

Tính ổn định của khí quyển được định nghĩa là một luồng không khí có thể di chuyển lên hoặc xuống sau khi nó đã bị dịch chuyển theo phương thẳng đứng một lượng nhỏ (John L. Woodward, 2010). Nếu luồng không khí có xu hướng quay trở lại vị trí ban đầu sau khi tác động thì khí quyển được coi là ổn định, trong khi nếu luồng không khí tăng theo phương thẳng và luôn biến động thì được biết là điều kiện không ổn định. Điều kiện trung lập là khi luồng khí quyển có xu hướng giữ nguyên vị trí sau khi di chuyển với một biên độ nào đó. Các cấp độ ổn định phụ thuộc vào nhiễu loạn nhiệt, ổn định tĩnh và nhiễu cơ học. Rối loạn tĩnh liên quan đến sự thay đổi nhiệt độ với sự thay đổi độ cao, nhiễu loạn cơ học phụ thuộc vào ảnh hưởng của tốc độ gió và độ nhám bề mặt của địa hình. Tốc độ thay đổi có thể được định nghĩa là tốc độ mà nhiệt độ khí quyển giảm hoặc tăng khi độ cao thay đổi, giúp xác định sự ổn định của khí quyển. Điều kiện trung tính có thể được xác định khi tỷ lệ lệch đoạn nhiệt và môi trường là như nhau. Năm 1961, Pasquill và Gifford đã phát triển một phương pháp phân loại lượng nhiễu động có trong khí quyển và được coi là phương pháp được sử dụng phổ biến nhất (Jitesh Kumar Mittal, 2015). Các lớp ổn định của tầng mây là để phân loại độ ổn định của một vùng khí quyển theo tốc độ gió ngang, lượng bức xạ mặt trời và độ che phủ phân đoạn của mây. Cuối cùng, Passquill và Gifford đã phân loại các nhiễu động khí quyển thành 6 lớp ổn định, được đặt tên như trong Bảng 3 và các điều kiện khí tượng của chúng được liệt

kê trong Bảng 4. Trong số đó, lớp A được coi là lớp hỗn loạn hoặc không ổn định nhất và F - class là lớp ổn định nhất hoặc ít xáo trộn nhất. Nó ảnh hưởng đến chuyển động thẳng đứng của không khí.

Bảng 3. Lớp ổn định khí quyển theo tác giả Pasquill (Ngoc - Tuoc Do và nnk., 2020).

Lớp ổn định khí quyển	Định nghĩa	Lớp ổn định khí quyển	Định nghĩa
A	Rất không ổn định	D	Trung tính
B	Không ổn định	E	Ổn định nhẹ
C	Không ổn định nhẹ	F	Ổn định

Bảng 4. Điều kiện khí hậu được định nghĩa theo lớp ổn định của tác giả Pasquill (Ngoc - Tuoc Do và nnk., 2020).

Tốc độ gió bề mặt (m/s)	Thời gian ngày bức xạ mặt trời			Thời gian đêm (mây bao phủ)	
	Mạnh	Trung bình	Nhẹ	>50%	<50%
<2	A	A - B	B	E	F
2÷3	A - B	B	C	E	F
3÷5	B	B - C	C	D	E
5÷6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Dựa trên số liệu thu thập được trong 4 ngày thử nghiệm ở mỏ, như trong Hình 3 và Bảng 2, có thể thấy rằng hướng gió không thay đổi ở cả hai trạm quan trắc cố định trên mặt đất. Như đã đề cập ở trên, tốc độ gió nằm trong khoảng 0,16÷3,34 m/s tại trạm quan trắc cố định đầu tiên; 1,06÷5,85 m/s tại trạm cố định thứ hai. Dựa trên các lớp ổn

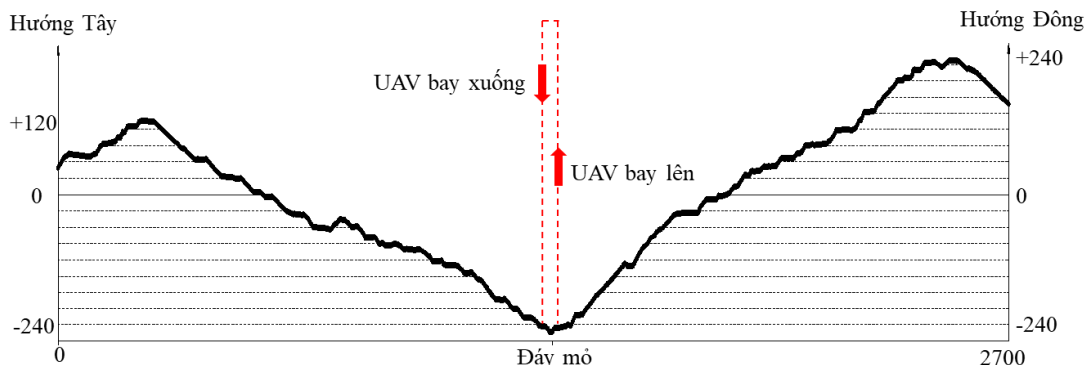
định Passquill trong Bảng 4, lớp C là lớp ổn định khí quyển trong bài kiểm tra 4 ngày vào ban ngày, trong khi lớp E hoặc F là lớp ổn định khí quyển vào ban đêm. Sự ổn định ảnh hưởng đến dòng chảy không khí trong mỏ bằng cách ảnh hưởng đến chuyển động thẳng đứng. Sumanth Chinthala, Mukesh Khare (2011) quan sát thấy rằng một bầu khí quyển ổn định ngăn chặn chuyển động thẳng đứng của các ô nhiễm, dẫn đến lắng đọng các chất ô nhiễm. Kết quả đo tại mỏ lộ thiên Cọc Sáu cho thấy các lớp ổn định khí quyển là trung tính vào ban ngày và ổn định vào ban đêm. Quan sát này chỉ ra rằng các chất ô nhiễm được tạo ra như PM10 hoặc khí độc hầu như không bị phân tán dưới tác động của các lớp ổn định khí quyển trung tính và ổn định.

3.2. Hiện tượng nghịch đảo nhiệt độ tại các mỏ lộ thiên sâu

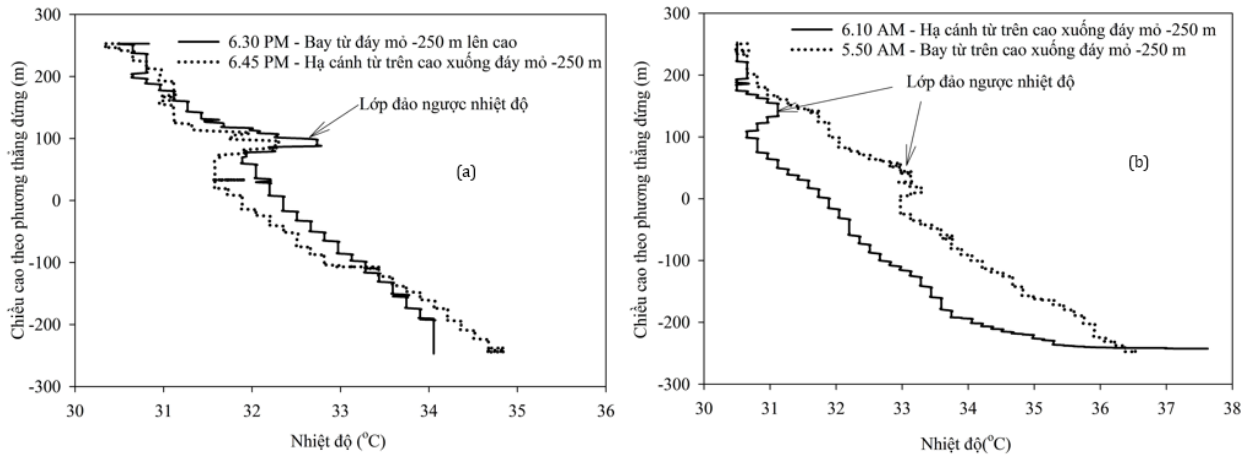
Dựa trên các kết quả đo đạc được trong 4 ngày thử nghiệm tại mỏ than lộ thiên Cọc Sáu, cho thấy cấp độ ổn định của khí quyển là C vào ban ngày, còn cấp E hoặc F vào ban đêm. Lớp C vào ban ngày có nghĩa là có thể tác động đến sự lắng đọng của các hạt ô nhiễm và lớp E hoặc F vào ban đêm cho biết rằng có thể tác động đến sự lắng đọng của các hạt ô nhiễm và chất lượng không khí làm hạn chế sự phân tán trên không của bầu khí quyển. Những kết quả có nghĩa là các chất ô nhiễm được tạo ra như PM10 và khí độc hầu như không bị phân tán dưới các loại tác động của lớp ổn định khí quyển E và F.

Clive Grainger, Robert N. Meroney (1993) quan sát thấy rằng hiệu ứng lớp đảo ngược chủ yếu ở các mỏ lộ thiên và địa hình thung lũng xuất

hiện thường xuyên hơn là trên địa hình bằng phẳng. Hơn nữa, sự đảo ngược của nhiệt độ thường xảy ra về đêm (Craig B. Clements và nnk., 2003; Mark F. Hibberd, 2003). Hiện tượng nghịch đảo nhiệt độ có thể hiểu đơn giản là theo nguyên tắc vật lý khi càng lên cao thì nhiệt độ càng giảm. Tuy nhiên, tại các địa hình đồi núi và thung lũng như các mỏ lộ thiên sâu do sự hình thành của các lớp khí quyển ổn định tạo thành các đám mây bao phủ lên các dạng địa hình này. Nhiệt độ tại đây sẽ cao hơn nhiệt độ phía dưới. Sự nghịch đảo nhiệt độ không khí ảnh hưởng đến môi trường mỏ bề mặt dưới dạng tích tụ các chất ô nhiễm có nồng độ cao hơn (khí và bụi) (Sumanth Chinthala, Mukesh Khare, 2011). Tuy nhiên, hầu như không có dữ liệu về khí tượng về đêm ở các mỏ lộ thiên sâu. Trong nghiên cứu này, các sự thay đổi nhiệt độ theo chiều thẳng đứng được đo để xác định sự biến thiên nhiệt độ và xác định độ ổn định của luồng không khí cũng như lớp đảo nhiệt độ bằng thiết bị máy bay không người lái (UAV). Để khảo sát độ biến thiên nhiệt độ tại mỏ than Cọc Sáu theo phương thẳng đứng, cảm biến nhiệt độ đã được gắn vào UAV. Chiếc UAV này được điều khiển bay thẳng đứng từ đáy moong (-250 m) lên cao phía trên mặt mỏ như trong Hình 4. Thí nghiệm được thực hiện hai lần một ngày, trước khi mặt trời mọc và sau khi mặt trời lặn. Sự biến thiên nhiệt độ theo phương thẳng đứng được thể hiện trong Hình 5. Có thể quan sát thấy rằng hiệu ứng nghịch đảo nhiệt độ đã xảy ra trong hai lần thử nghiệm. Lớp nghịch đảo nhiệt độ có thể được nhìn thấy trong Hình 5 (a) ở độ cao thẳng đứng 20 m và 150 m. Một mô hình tương tự có thể được quan sát trong Hình 5 (b) ở độ cao thẳng đứng 100 m.



Hình 4. Đường bay của UAV để đo nhiệt độ theo phương thẳng đứng.



Hình 5. Sự thay đổi nhiệt độ theo phương đứng. (a) Thí nghiệm 1; (b) Thí nghiệm 2.

Hơn nữa, Pasquill đã phân loại các lớp ổn định khí quyển dựa trên sự biến thiên nhiệt độ thẳng đứng, như thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5. Các lớp ổn định khí quyển của Pasquill theo độ biến thiên nhiệt độ.

Lớp ổn định khí quyển	Sự biến thiên nhiệt độ theo phương thẳng đứng, $\Delta T/\Delta Z$ (Độ C/100m)	Định nghĩa
A	-1,9	Rất không ổn định
B	-1,9 ÷ -1,7	Không ổn định
C	-1,7 ÷ -1,5	Hơi không ổn định
D	-1,5 ÷ -0,5	Trung tính
E	-0,5 ÷ 1,5	Hơi ổn định
F	1,5 ÷ 4,0	Ổn định
G	> 4,0	Rất ổn định

Về vấn đề này, sự biến thiên nhiệt độ được quan sát trong 3 ngày. Kết quả cho thấy, sự biến thiên nhiệt độ trong khoảng 0,64 ÷ 1,53 °C /100 m. Dựa trên phân loại trong Bảng 5, độ ổn định của bầu không khí có thể được phân loại thành các cấp E và F cho các phép đo tại địa điểm nghiên cứu. Kết quả này tương tự như phân loại ở trên dựa vào tốc độ gió. Do các lớp ổn định khí quyển là "hơi không ổn định" và "ổn định". Sự phân tán của các chất ô nhiễm sinh ra trong mỏ hầu như không được phân tán ra ngoài. Dự kiến sẽ dẫn đến nồng độ khí CO và bụi PM10 cao trong mỏ. Đây là những quan sát thu được trong quá trình nghiên cứu, như trong Hình 6 cho thấy nồng độ cao của khí CO và PM10 sau khi

mặt trời lặn. Có thể thấy rằng do lớp ổn định khí quyển "hơi không ổn định" và "ổn định" và sự tồn tại của lớp nghịch đảo nhiệt độ trong Hình 5 (b) đã góp phần làm cho nồng độ khí CO và PM10 cao. Nồng độ CO tiếp tục tăng khi thời gian trôi qua, trong khi nồng độ PM10 gần như không đổi. Những kết quả này chỉ ra rằng các chất ô nhiễm tạo ra trong hố không được phân tán hiệu quả ra khỏi hố sâu do hệ thống thông gió của hố kém (Bảng 6).

Bảng 6. Sự biến thiên nhiệt độ theo phương thẳng đứng tại mỏ Cọc Sáu.

Ngày thí nghiệm	Trước khi mặt trời mọc		Sau khi mặt trời lặn	
	UAV bay lên	UAV bay xuống	UAV bay lên	UAV bay xuống
Ngày 1	1,17	1,53	0,64	0,68
Ngày 2	0,68	0,84	1,53	1,28
Ngày 3	1,21	1,12	1,13	1,23

4. Mô phỏng sự phát tán không khí tại mỏ lộ thiên sâu

Nhiều nghiên cứu đang sử dụng công cụ CFD trong mô phỏng môi trường. ANSYS - FLUENT là phần mềm CFD nổi tiếng hiện nay trên thế giới. Trong nghiên cứu này, phân tích CFD được thực hiện bằng cách sử dụng ANSYS - FLUENT, thường được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng để nghiên cứu các vấn đề khác nhau về dòng chảy không khí và truyền nhiệt trong môi trường mỏ (Vanduc Nguyen và nnk., 2018). Dựa trên quy mô thực của địa điểm thử nghiệm trong Hình 2 (b), bố cục hình

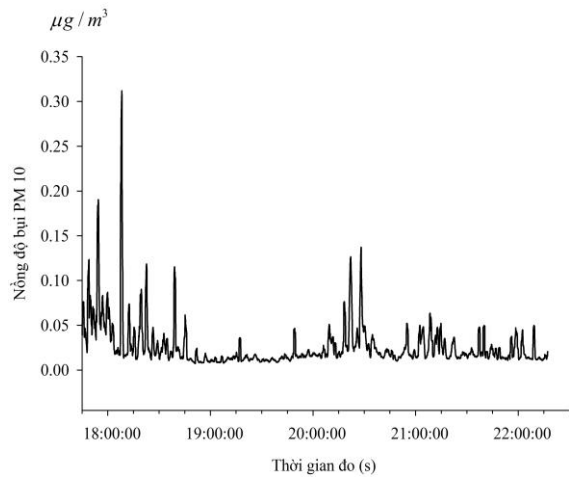
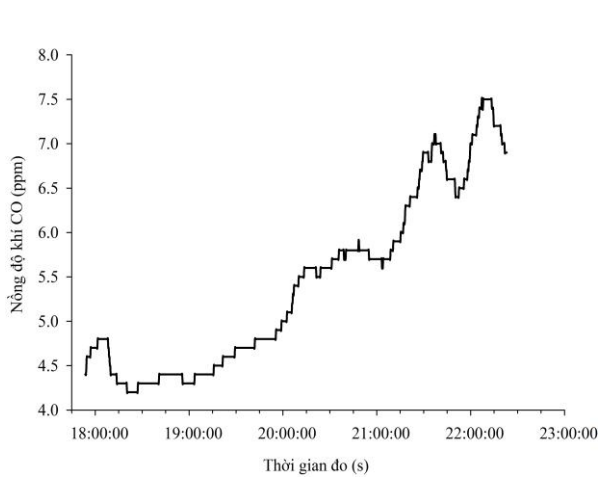
học 3D để phân tích CFD được minh họa trong Hình 7. Điều kiện ban đầu của mô phỏng CFD có thể được trình bày trong Bảng 7. Để đánh giá cơ chế phân tán khí dưới tác dụng của cấp độ ổn định khí quyển, như đã đề cập ở trên, 09 nguồn không khí ô nhiễm được xác định dựa trên vị trí của máy xúc và xe tải tại địa điểm làm việc thực tế trên mỏ trong thời gian thí nghiệm.

Trên thực tế, trong các mỏ lộ thiên còn có các khí khác như: mêtan (CH₄), cacbon monoxit (CO), lưu huỳnh đioxit (SO₂) và nitơ đioxit (NO₂). Tuy nhiên, cơ chế phân tán khí trong lớp ổn định khí quyển là tương tự nhau. Do đó, trong nghiên cứu này, chỉ có khí CO được sử dụng như một chất ô nhiễm dạng khí độc để đánh giá hành vi phát tán. Về dữ liệu đầu vào của tốc độ gió để phân tích CFD các phép đo vận tốc gió tại trạm cố định đầu tiên

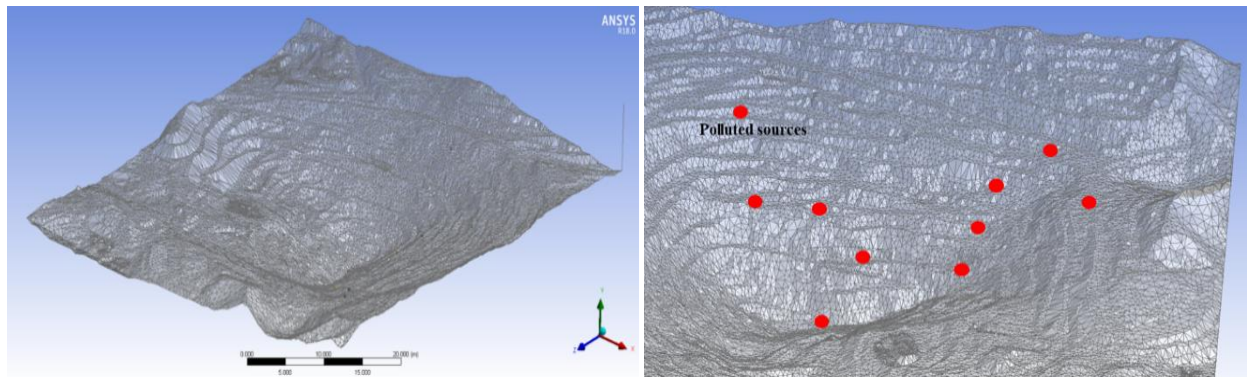
(+105 m) trong Hình 3 (c) đã được sử dụng như là thông số đầu vào của vận tốc gió trên mặt mỏ.

Bảng 7. Điều kiện đầu vào cho mô phỏng.

Thông số	Mô hình mô phỏng CFD
Biên giới đầu vào	Vận tốc gió
Biên giới tường	Ma sát
Sức cản gió (k)	0,014 kg/m ³
Nhiệt độ biên	37 ⁰ C
Phương pháp chia lưới	Phần tử tứ diện
Mô hình giải pháp	Mô hình nhiễu loạn (k - ε)
Chức năng kích thước lưới	Khoảng gần và độ cong
Số lượng phần tử lưới	3.000.000
Điều kiện mô phỏng	Thay đổi



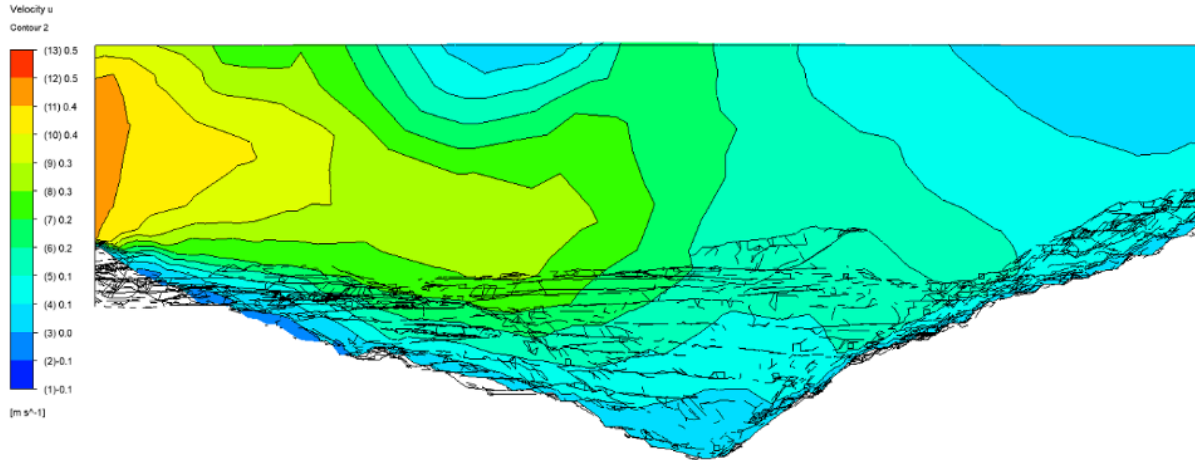
Hình 6. Kết quả đo nồng độ ô nhiễm tại trạm đo cố định đáy mỏ mức -250 m. (a) Nồng độ CO (ppm); (b) Sự tập trung của bụi mịn PM₁₀ (ppm).



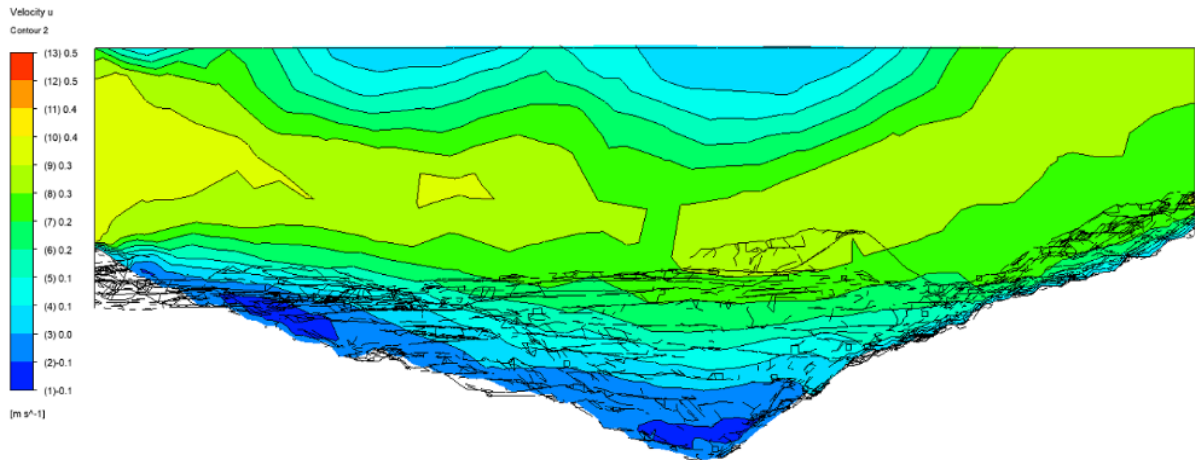
Hình 7. Mô hình 3D cho mô phỏng và nguồn phát tán ô nhiễm tại mỏ than Cọc Sáu. (a) Mô hình 3D của mỏ Cọc Sáu cho mô phỏng; (b) Các vị trí máy xúc và ô tô như là nguồn phát tán ô nhiễm tại mỏ.

Hình 8 cho thấy sự phân bố theo thời gian của vận tốc không khí bằng phân tích CFD. Có thể quan sát thấy tốc độ thấp $0 \div 0,1$ m/s chủ yếu ở đáy mỏ. Trong Hình 8, tất cả các phân bố thời gian từ 2÷24 giờ là tương tự nhau. Kết quả này cho thấy do vận

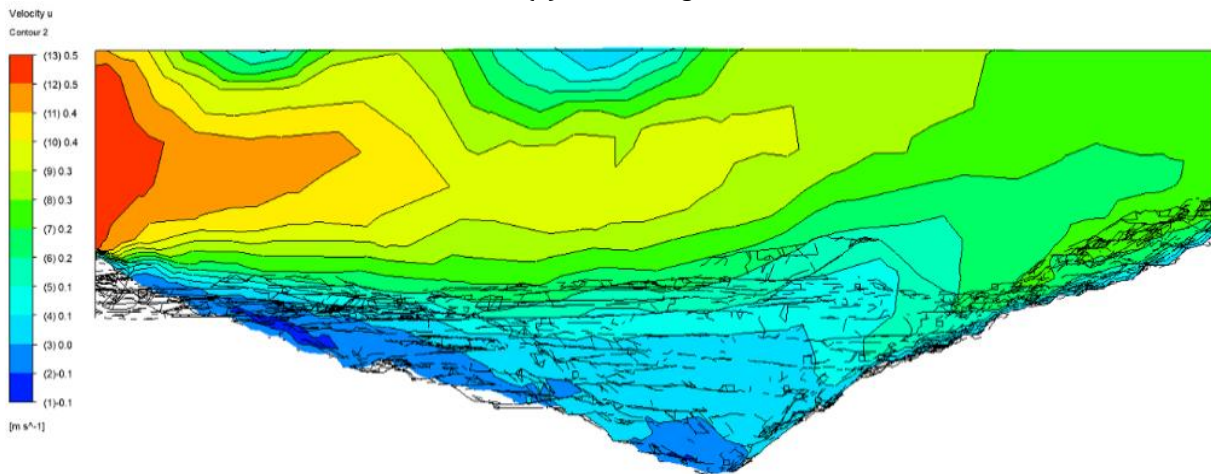
tốc phân bố ở đáy mỏ thấp nên không khí ô nhiễm sinh ra hầu như không bị phân tán ra khỏi hố sâu của mỏ và tồn đọng trong thời gian dài. Hiện tượng này thể hiện rõ ràng trong Hình 9, nơi khí CO nồng độ cao vẫn ở gần đáy hố dù sau một ngày.



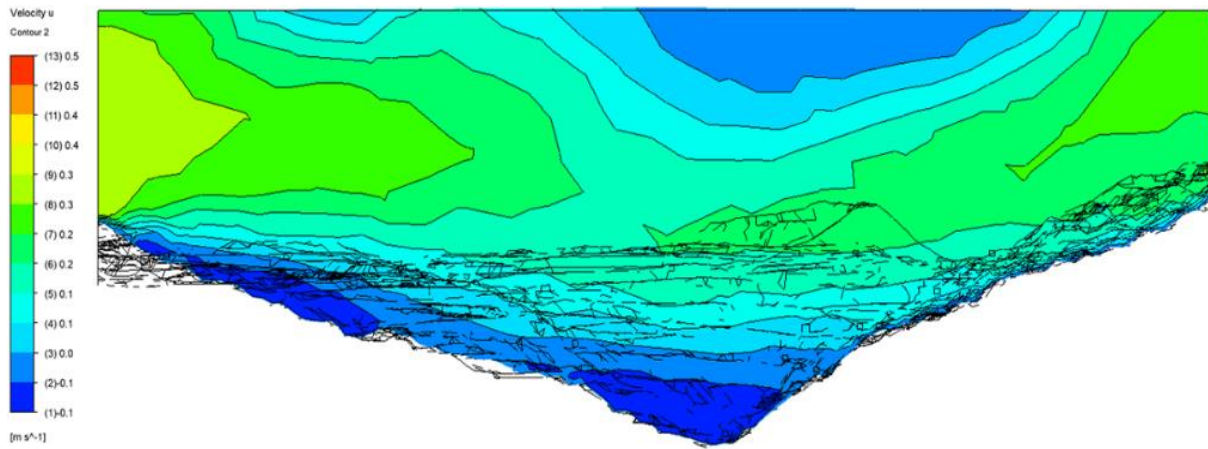
(a) Sau 2 tiếng.



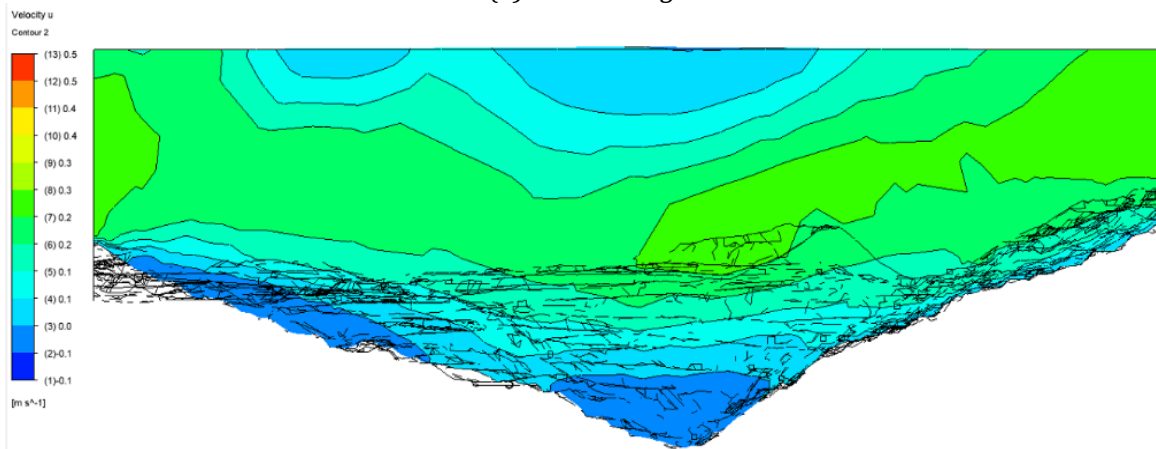
(b) Sau 4 tiếng.



(c) Sau 8 tiếng.

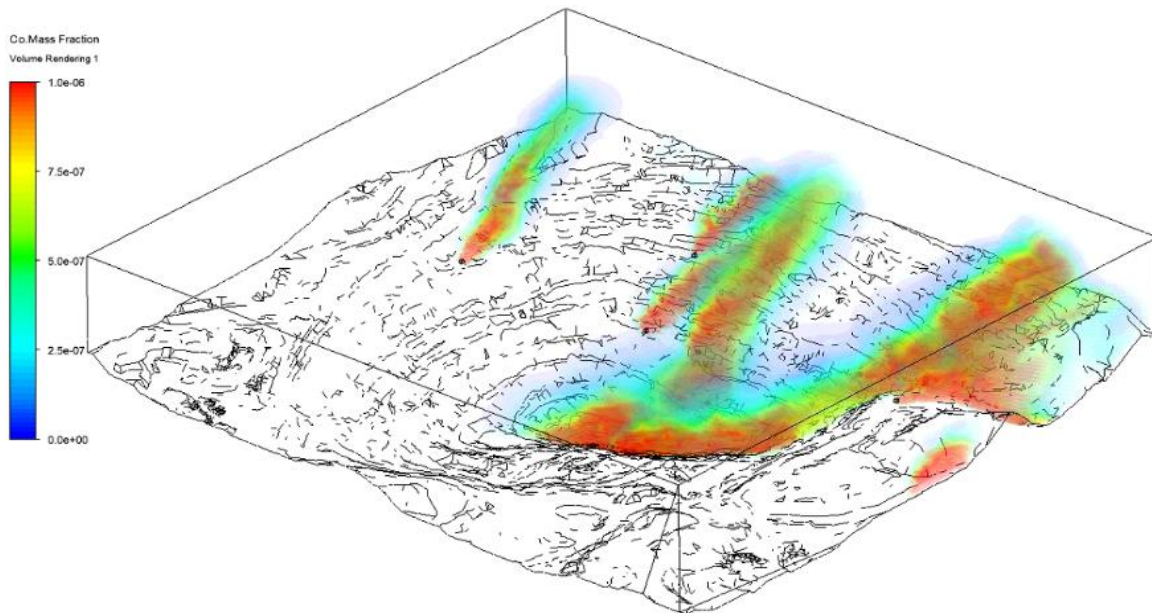


(d) Sau 16 tiếng.



(e) Sau 24 tiếng.

Hình 8. Phân bố vận tốc không khí theo thời gian bằng phân tích CFD.



Hình 9. Sự tập trung khí CO bằng kết quả mô phỏng sau 24 giờ.

Từ Hình 10, có thể thấy rằng vận tốc thấp ở đáy hố được cho là nguyên nhân làm cho nồng độ CO cao. Nồng độ CO tiếp tục tăng và xu hướng này khá giống với dữ liệu thí nghiệm, như trong Hình 6 (a). Các kết quả này chỉ ra rằng các chất ô nhiễm sinh ra trong hố hầu như không bị phân tán ra khỏi hố sâu nếu tình hình khí hậu gần hố vẫn như cũ. Dựa trên nghiên cứu này, không khí ô nhiễm trong hố không thể được phân tán hiệu quả nếu chỉ thông gió tự nhiên ở tầng sâu hơn. Chính việc quy hoạch khai thác mỏ than lộ thiên Cọc Sáu trong tương lai có chiều sâu hơn, bụi và khí có thể ảnh hưởng không nhỏ đến người lao động. Do đó, các tác giả hy vọng rằng các kết quả thu được trong nghiên cứu này sẽ hữu ích cho các giải pháp tiềm năng trong việc kiểm soát chất lượng không khí ở các mỏ than lộ thiên sâu.

5. Kết luận

Nghiên cứu này nhằm đánh giá tác động của các điều kiện khí quyển đến chất lượng không khí trong mỏ lộ thiên sâu. Độ ổn định của tầng khí quyển tại mỏ Cọc Sáu, mỏ than lộ thiên sâu nhất Việt Nam, được khảo sát về tốc độ/hướng gió, sự biến thiên nhiệt độ theo phương thẳng đứng. Với kết quả khí tượng thí nghiệm, phân tích 3D CFD đã được thực hiện để tìm hiểu cơ chế loại bỏ chất ô nhiễm ở dạng khí. Kết quả có thể đưa ra cảnh báo nâng cao về các vấn đề phát thải tiềm ẩn và tạo cơ

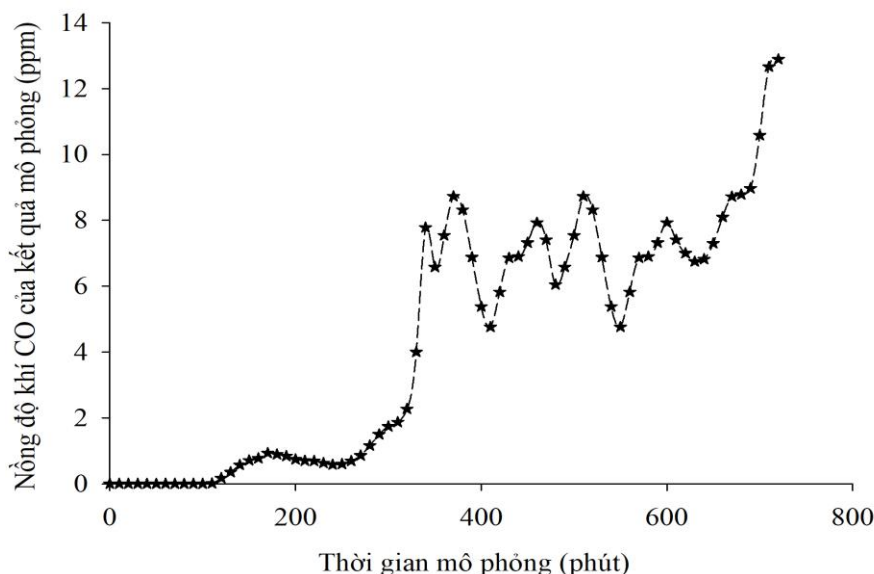
sở cho việc lập kế hoạch trong tương lai. Một số kết quả đáng kể có thể được tóm tắt như sau:

1. Lớp ổn định khí quyển trong thí nghiệm 4 ngày tại mỏ Cọc Sáu là lớp C vào ban ngày và E hoặc F vào ban đêm. Kết quả này ngụ ý rằng các lớp ổn định của khí quyển là trung tính vào ban ngày và ổn định nhẹ hoặc ổn định vào ban đêm. Những quan sát này cho thấy rằng các chất ô nhiễm sinh ra như PM10 hoặc khí độc hầu như không bị phân tán trong điều kiện khí quyển kém.

2. Phương pháp đo độ biến thiên nhiệt độ thẳng đứng cho thấy sự tồn tại của lớp nghịch đảo nhiệt độ. Các lớp ổn định khí quyển được phân loại là E và F dựa trên các phép đo độ biến thiên nhiệt độ theo phương thẳng đứng và kết quả này tương tự như phân loại dựa trên tốc độ gió.

3. Vận tốc không khí thấp $0 \div 0,1$ m/s và nồng độ cao của khí CO được phân tích ở đáy hố bằng phân tích CFD. Kết quả này khá tương đồng với kết quả thí nghiệm. Điều này là một thông tin hữu ích cho các mỏ lộ thiên sâu khi có kế hoạch xuống sâu cần phải có các giải pháp để kiểm soát chất lượng không khí một cách hiệu quả.

4. Vì chất lượng không khí tại các mỏ lộ thiên sâu có khả năng trở nên tồi tệ hơn khi các mỏ đào sâu hơn, nghiên cứu này sẽ cung cấp kiến thức cơ bản để hiểu về cơ chế phân tán chất ô nhiễm và phát triển việc kiểm soát chất lượng không khí hiệu quả cũng như có những giải pháp kịp thời khi các mỏ tiếp tục xuống sâu.



Hình 10. Sự tập trung khí CO tại đáy mỏ bằng kết quả mô phỏng sau 12 giờ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2018 - MDA - 03SP.

Đóng góp của các tác giả

Bùi Xuân Nam và Changwoo Lee - lên ý tưởng, xây dựng đề cương, đọc bản thảo bài báo và cho các ý kiến góp ý; Bùi Văn Tuyên và Lê Quý Tháo - thu thập số liệu, triển khai thực nghiệm; Nguyễn Hoàng - xử lý số liệu và viết bản thảo.

Tài liệu tham khảo

Clive Grainger, Robert N. Meroney. (1993). Dispersion in an open - cut coal mine in stably stratified flow. *Boundary - layer meteorology*. 63(1), 117 - 140.

Craig B. Clements, C. David Whiteman and John D. Horel. (2003). Cold - air - pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah. *Journal of Applied Meteorology*, 42(6). 752 - 768.

D. Bruce Turner. (2020). *Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling*, CRC press.

Jitesh Kumar Mittal. (2015). *Modelling the Dispersion of Dust Generated From Open Pit Mining*.

John L. Woodward. (2010). *Estimating the flammable mass of a vapor cloud*, 21, John Wiley & Sons.

L. Morawska, M. R. Moore, and Z. D. Ristovski. (2004). *Impacts of Ultrafine Particles*. Australian Government. Department of the Environment and Heritage Health. 9.

Lewis Fry Richardson. (1926). Atmospheric diffusion shown on a distance - neighbour graph. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 110

(756). 709 - 737.

Mark F. Hibberd. (2003). Nocturnal dispersion meteorology in an urban valley. *Clean Air and Environmental Quality*, 37(4), 34.

Ngoc - Tuoc Do, Won - Ho Heo and Ngoc - Bich Nguyen. (2020). Evaluating the Air Flow and Gas Dispersion Behavior in a Deep Open - Pit Mine Based on Monitoring and CFD Analysis: A Case Study at the Coc Sau Open - Pit Coal Mine (Vietnam). *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining: ISRM 2020 - Volume 1*. Springer Nature, 224.

Partha Sarathi Panda, Rajat Sahu. (2013). Ambient air quality assessment in opencast metal mines.

S. R. Hanna, G. A. Briggs and R. P. Hosker Jr. (1982). *Handbook on atmospheric diffusion*. Technical Information Center, US Department of Energy. DOE/TIC - 11223.

Sumanth Chinthala, Mukesh Khare, (2011). Particle dispersion within a deep open cast coal mine. *Air Quality - Models and Applications*.

Torben Mikkelsen, Morten Nielsen, (2003). *Modelling of pollutant transport in the atmosphere*. MANHAZ position paper, Risø National Laboratory. Denmark.

Vanduc Nguyen, Dooyoung Kim, Wonho Hur and Changwoo Lee, (2018). Experimental and CFD study on the exhaust efficiency of a smoke control fan in blind entry development sites. *Tunnel and Underground Space*. 28(1). 38 - 58.

Yakunin A. G., (2017). 3D Ultrasonic Anemometer with tetrahedral arrangement of sensors. *In Journal of Physics: Conference Series*, 881(1), 012030). IOP Publishing.

Zunaira Asif, Zhi Chen, (2016). Environmental management in North American mining sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1), 167 - 179.