

Perception de la qualité de l'air dans les voitures : impact des niveaux de CO₂ et de la circulation d'air

Crisanta-Alina Mazilescu
DPPD
Universite Politehnica Timisoara
Timisoara, Roumanie
alina.mazilescu@upt.ro

Doru Constantin
MMUT
Universite Politehnica Timisoara
Timisoara, Roumanie
doru.constantin@upt.ro

Felicia Banciu
IMF
Universite Politehnica Timisoara
Timisoara, Roumanie
felicia.banciu@upt.ro

Résumé — Cet article vise à examiner l'impact du CO₂ et de la circulation interne de l'air, sur la perception de la qualité de l'air à l'intérieur du véhicule. Pour atteindre cet objectif nous avons utilisé une échelle de Likert à 7 points. 30 étudiants ont participé à l'évaluation, fournissant chacun quatre évaluations, à deux niveaux de CO₂ différents (1000 ppm et 5000 ppm) avec et sans circulation d'air dans l'habitacle. Les résultats obtenus indiquent que tant les niveaux de CO₂ et la circulation interne de l'air jouent un rôle significatif dans la perception de la qualité de l'air, lors du passage d'un air propre à un air contenant 5000 ppm de CO₂. Par ailleurs, les résultats révèlent que l'augmentation de la circulation interne de l'air peut contribuer à une meilleure appréciation de la qualité de l'air.

Mots clés — perception, qualité de l'air, véhicule

I. INTRODUCTION

Dans le contexte du développement durable la qualité de l'air et les émissions de dioxyde de carbone, en particulier dans les transports urbains et aériens, suscitent un vif intérêt parmi les chercheurs [1]. Les préoccupations des constructeurs automobiles concernant la qualité de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule doivent concilier et satisfaire à la fois les aspects liés au confort et ceux liés à la sécurité routière, sans négliger la réduction de la consommation d'énergie. Les véhicules modernes et étanches réduisent considérablement les pertes de chaleur et de bruit à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule, mais empêchent le renouvellement naturel de l'air à l'intérieur du véhicule. De plus, les performances très bonnes des nouveaux moteurs réduisent la perte d'énergie, mais cette énergie était utilisable pendant l'hiver pour chauffer l'habitacle.

Pendant les déplacements en véhicule, les passagers sont exposés à des polluants atmosphériques qui s'infiltrent à l'intérieur de la voiture. Ces polluants peuvent avoir des origines aussi bien internes, tels que les Composés Organiques Volatils (COV), qu'externes, comme les gaz d'échappement, la poussière, le pollen et le dioxyde de carbone (CO₂) émis par les passagers. Il est essentiel de prendre en considération ces facteurs pour garantir une qualité optimale de l'air pour les passagers [2-4].

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un composant de l'air, naturellement émis par les êtres vivants par le biais de la respiration. La concentration de CO₂ dans l'air ambiant varie généralement entre 350 ppm et 2500 ppm dans les environnements habités, bien qu'elle puisse atteindre 3000 ppm ou 4000 ppm en fonction du nombre de personnes présentes et de la ventilation de l'air. Au niveau mondial et européen, il existe des réglementations concernant la ventilation des espaces habités [5]. En France, par exemple,

les règles indiquent un niveau de 1000 ppm de CO₂ pour une occupation normale des bâtiments non résidentiels, avec une marge de tolérance permettant des valeurs allant jusqu'à 1300 ppm dans les zones non-fumeurs. En 2004, une valeur de 5000 ppm a été réglementée pour l'exposition professionnelle. Ces mêmes limites sont fixées dans 19 autres pays européens, avec également des expositions à court terme autorisées entre 10 000 et 30 000 ppm [5-6].

En ce qui concerne les normes en matière de CO₂ pour les véhicules, a notre connaissance sont les normes de l'Administration de la protection de l'environnement de Taïwan, établies à 1000 ppm pour 8 heures de CO₂ pour les autobus, et les directives sur la qualité de l'air du Département de la protection de l'environnement de Hong Kong (1 heure de CO₂ : 2500 ppm pour le niveau 1 pour les autobus).

Le niveau 1 - 2500 ppm (4500 mg/m³) représente une bonne qualité de l'air pour laquelle aucun problème de santé n'est identifié. Le niveau 2 - 3500 ppm (6300 mg/m³) représente une qualité de l'air pour laquelle aucun problème de santé n'est identifié [7].

A. Effets du CO₂ sur la santé

L'impact du dioxyde de carbone (CO₂) sur la santé humaine est complexe et dépendant de la concentration. Des études ont révélé une gamme de symptômes, notamment le syndrome des bâtiments [8], des problèmes respiratoires [9], des infections ORL [10], des éruptions cutanées, et des effets cardiovasculaires tels qu'une augmentation de la pression artérielle [11]. À des niveaux extrêmement élevés au-dessus de 50,000 ppm, le CO₂ peut entraîner des effets graves, y compris l'inflammation pulmonaire, des perturbations du système nerveux central, voire le coma et la mort à environ 200000 ppm [12].

B. Effets du CO₂ sur les performances cognitives

Des recherches récentes ont démontré que l'augmentation du taux de ventilation au-delà des recommandations normales peut entraîner une augmentation significative de la productivité, pouvant aller de 5% à 10% [13]. À titre d'exemple, au Royaume-Uni, les recommandations en matière d'approvisionnement en air frais pour les salles de classe s'élèvent à 3 L (L/s.e), avec une capacité de fournir 8 L/s.e [14].

Bien que les études sur les effets du dioxyde de carbone (CO₂) à l'intérieur des véhicules soient encore limitées [15], un ensemble de recherches menées en laboratoire, en milieu scolaire, et même dans l'espace, ont mis en évidence des altérations significatives dans

les capacités humaines telles que l'attention, la prise de décision, et les performances académiques [16-17].

Par exemple, des études ont révélé que des niveaux élevés de CO₂ à l'intérieur de bus touristiques à grande capacité peuvent avoir un impact majeur sur la sécurité des transports [15]. D'autres recherches ont corroboré ces conclusions en montrant que l'augmentation des niveaux de CO₂ peut affecter de manière significative la prise de décision [16, 18]. De plus, des concentrations de CO₂ dépassant les 3000 ppm ont été associées à une diminution de la concentration, à une baisse du bien-être général et à des performances cognitives moins optimales [19-21].

C. Effets du CO₂ sur la Perception du Confort

Le troisième aspect étudié concernant les effets du dioxyde de carbone est sa relation avec la perception de l'état de confort, en particulier avec la perception de la qualité de l'air. Wargocki a constaté que l'acceptabilité de la qualité de l'air, sa fraîcheur et la réduction de la perception des odeurs augmentent significativement avec le niveau de ventilation (et donc avec des niveaux de CO₂ plus faibles), mais ces différences ne sont perçues que lors de l'entrée dans la pièce [21]. Dans l'étude de 2004, aucune de ces variables n'est signalée comme significative. D'autres chercheurs ont obtenu des résultats significatifs entre la réduction du CO₂ et la perception de la qualité de l'air, notamment en ce qui concerne la fraîcheur de l'air, la perception de températures plus basses, une augmentation de la perception du mouvement de l'air et une diminution de la perception des odeurs [21].

L'air recirculé dans la cabine peut avoir des avantages pour les conducteurs qui choisissent de l'activer : il est considéré comme l'option la plus efficace en termes de gestion thermique de la voiture et contribue à réduire la consommation d'énergie [22]. L'argument de la gestion thermique efficace est pris en compte dans le cas des voitures électriques afin d'augmenter l'autonomie du véhicule. Les bus avec climatisation fonctionnant en mode de recirculation présentent un taux d'échange d'air insuffisant et élèvent par conséquent le risque d'accidents de la route, car les conducteurs de bus utilisent le système de climatisation en mode de recirculation la plupart du temps [23].

D. CO₂, Qualité de l'Air et Ventilation

La relation entre le dioxyde de carbone (CO₂) et la ventilation a été soulignée en utilisant le CO₂ comme indicateur indirect de la qualité de l'air. La concentration de CO₂ dans un environnement intérieur reflète l'efficacité du système de ventilation et la suffisance de la ventilation [24].

Il existe plusieurs moyens d'améliorer la qualité de l'air intérieur dans les voitures, la méthode la plus courante et efficace étant la dilution de l'air pollué avec de l'air frais grâce au système de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC) du véhicule. Pour maintenir les niveaux de CO₂ en dessous de 1100 ppm à l'intérieur de la cabine, le système de ventilation doit permettre l'introduction d'air frais de l'extérieur [24].

La méthode de recirculation fractionnée de l'air est une approche simple mais innovante pour améliorer la qualité de l'air dans la cabine. Elle permet non seulement des économies d'énergie, mais réduit également la consommation par temps de forte chaleur.

Michel Grady et ses co-auteurs ont proposé une méthode de recirculation fractionnée de l'air pour l'air de la cabine et ont mené une étude sur l'amélioration de la qualité de l'air en réduisant les concentrations de particules [25]. Ils ont démontré que les concentrations de CO₂ dans la cabine pouvaient être efficacement maintenues en dessous d'un niveau cible de 2000 ppm dans différentes conditions de conduite et de vitesse du ventilateur, avec un ratio de 85 % d'air recyclé à 15 % d'air frais.

L'efficacité énergétique des systèmes de climatisation automobile et leur impact sur la qualité de l'air à l'intérieur des véhicules sont des préoccupations majeures pour l'industrie automobile. Une analyse économique réalisée sur une Toyota Prius de 2012 par C. Li et al. [26] a révélé que l'utilisation de la recirculation de l'air dans la cabine permettait non seulement des économies d'énergie, mais également une amélioration de la qualité de l'air. Cependant, la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) à l'intérieur des véhicules est influencée par divers facteurs tels que le volume du véhicule, les taux de ventilation de l'air, la vitesse du ventilateur, le nombre d'occupants et l'utilisation du système de climatisation. De plus, l'introduction d'air frais pour réduire la concentration de CO₂ peut également entraîner l'introduction de polluants, bien que cette tendance soit atténuée dans les véhicules modernes conçus pour être hermétiques [23].

La présente recherche vise à étudier la perception de la qualité de l'air dans les voitures en termes de présence de différentes quantités de CO₂ dans l'air respiré.

II. METHODE

A. Participants

30 étudiants (17 garçons, 13 filles ; âge moyen = 18,9 ans), en première année d'études, d'une université technique de Timisoara ont participé à l'évaluation de la perception du qualité de l'air. Tous les participants ont accepté de participer à l'étude et ont confirmé avoir été informés du but de l'étude, de la procédure effectuée, des risques potentiels et des avantages de leur participation. Tous les participants ont déclaré ne pas avoir de problèmes de santé connus.

B. Procedure

Les participants ont reçu 4 formulaires d'évaluation et ont été chargés d'évaluer la qualité de l'air sur une échelle de 1 à 7 (1-très mauvaise ; 7-très bonne qualité de l'air). L'évaluation de l'air a été réalisée à 1000 ppm et respectivement à 5000 ppm, avec et sans circulation d'air. 30 étudiants ont participé à l'évaluation, fournissant chacun 4 évaluations, ce qui a donné un total de 120 évaluations (1000 ppm et 5000 ppm ; avec et sans circulation d'air).

Les évaluations ont été effectuées dans un véhicule Dacia Logan stationnaire, et les résultats ont été interprétés dans ces conditions. Nous avons opté pour un véhicule à l'arrêt afin d'éliminer l'influence de la vitesse du véhicule et des courants d'air autour du véhicule sur la concentration de CO₂ à l'intérieur de la cabine. Il est important de mentionner que l'évaluation subjective de la qualité de l'air peut être influencée par d'autres facteurs tels que le niveau d'humidité, la température, le vent et le niveau sonore dans l'enceinte [27-29]. Nous nous sommes efforcés de maintenir ces variables constantes tout au long des mesures à l'intérieur de l'enceinte pour éviter toute variation due à celles-ci. Plus précisément, dans l'espace clos où le véhicule utilisé pour les mesures était

garé, la température était maintenue à environ 23°C et une humidité de 37%.

III. RESULTATS

A. Évaluations générales de la qualité de l'air

Si on regarde les données présentées dans le tableau nr. 1 l'évaluation globale de la qualité de l'air est généralement bonne même s'il y a des différences significatives entre la perception de la qualité de l'air dans les situations mentionnées.

TABLE I. MOYENNES ET LES ECARTS-TYPES DE LA PERCEPTION DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEU

		1000ppm CO ₂			5000ppm CO ₂		
		n	M	SD	n	M	SD
qualite de l'air	+ CA	30	5.9	0.73	30	5.03	0.61
	- CA	30	4.53	0.82	30	4.02	0.79

+ CA = avec circulation de l'air ; - CA = sans circulation de l'air

Comme le montre la Figure 1, un pourcentage de 76.7% des participants ont évalué l'air à 5000 ppm comme étant de bonne ou assez bonne qualité, et 16.7% ont considéré que l'air n'était ni bon ni mauvais.

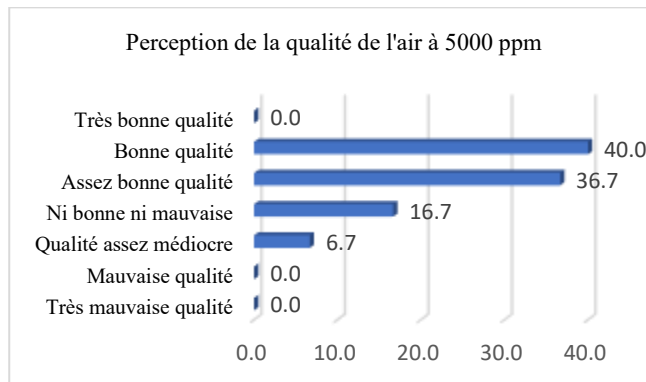


Fig. 1. Perception de la qualité de l'air a 5000 ppm

Bien que les différences dans la perception de la qualité de l'air diffèrent significativement entre les deux groupes mentionnés, généralement les participants ne considère pas la qualité de l'air comme mauvaise. Plus précisément, seulement 6.7% d'entre eux estimaient que la qualité de l'air était mauvaise ou assez mauvaise, tandis que 16.7% estimaient que l'air n'était ni bon ni mauvais, et 76.7% estimaient que la qualité de l'air était bonne ou assez bonne.

B. Perception de la qualité de l'air en fonction du taux de CO₂ et de la recirculation de l'air

L'analyse comparative effectuée à l'aide du test non paramétrique de Mann-Whitney indique une différence notable entre les deux groupes des participants (avec ou sans recirculation de l'air) à 5000ppm. Cette différence est statistiquement significative, comme le révèlent les résultats du test de Mann-Whitney ($U = 214$, $N_1 = 30$; $N_2 = 30$; $p = 0.002$). Mais il n'y a pas de différences significatives à 1000 ppm entre les groupes avec ou sans recirculation de l'air.

L'analyse comparative, réalisée à l'aide du Test de Wilcoxon en ce qui concerne la perception de la qualité de l'air à 1000ppm par rapport à 5000 ppm montre qu'il existe une différence significative dans l'évaluation de la qualité de l'air, pour l'ensemble des participants ($N = 60$, $z = 6.13$, $p =$

0.000), mais aussi séparément au sein des groupes de participants avec ou sans recirculation d'air.

Cependant, nous sommes intéressés à examiner si la perception de la qualité de l'air est influencée par la concentration de CO₂ et la circulation de l'air à l'intérieur de la cabine du véhicule. À cette fin, nous avons utilisé une analyse de régression multiple.

Les résultats du modèle de régression linéaire étaient significatifs, $F(3,116) = 27.64$, $p < .001$, $R^2 = 0.42$, ce qui indique qu'environ 42 % de la variance de la perception de la qualité de l'air est expliquée par le CO₂ et la circulation interne de l'air.

Plus précisément, dans les niveaux de CO₂, la catégorie de 5000 ppm a eu un impact significatif sur la perception de la qualité de l'air. Le coefficient de régression (B) pour cette catégorie était de -0.93, avec une valeur de t de -2.17 ($B = -0.93$, $t(116) = -2.17$, $p = .032$).

De plus, la circulation interne de l'air avait un effet significatif sur la perception de la qualité de l'air. Le coefficient de régression pour la circulation interne de l'air était de 0.97, avec une valeur de t de 5.04 ($B = 0.97$, $t(116) = 5.04$, $p < .001$).

En résumé, à la fois les niveaux de CO₂ et la circulation interne de l'air sont des prédicteurs importants de la perception de la qualité de l'air. Des niveaux de CO₂ plus élevés (en particulier 5000 ppm) sont associés à une perception de la qualité de l'air plus faible, tandis qu'une augmentation de la circulation interne de l'air tend à entraîner des valeurs de perception de la qualité de l'air plus élevées. Cependant, l'interaction entre les niveaux de CO₂ et la circulation interne de l'air n'a pas d'impact significatif sur la perception de la qualité de l'air.

Notre étude comporte certaines limitations. Nous n'avons pas pris en compte d'autres polluants atmosphériques tels que les COV (Composés Organiques Volatils) et les gaz d'échappement, la poussière, le pollen, etc., ni des facteurs tels que la température et l'humidité, qui ont été maintenus à des niveaux constants pendant les évaluations. De plus, les mesures ont été effectuées dans un véhicule stationnaire, ce qui limite la généralisation des résultats à des véhicules en mouvement. Des études futures pourraient remédier à ces limitations en élargissant la portée de la recherche et en incluant un plus grand nombre de participants.

IV. DISCUSSIONS

Cette étude se concentre sur la qualité de l'air à l'intérieur des véhicules, un aspect essentiel pour concilier confort, sécurité routière et efficacité énergétique. Les véhicules modernes, bien qu'étanches, limitent le renouvellement naturel de l'air à l'intérieur, ce qui peut avoir des conséquences sur la qualité de l'air pour les passagers. Les niveaux de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air ambiant varient en fonction de plusieurs facteurs, notamment le nombre de passagers, la ventilation et la circulation de l'air.

Il est intéressant de noter que dans notre étude, la majorité des participants, soit 76,7%, ont évalué la qualité de l'air à 5000 ppm de CO₂ comme étant de bonne ou assez bonne qualité, avec seulement 6,7% considérant la qualité de l'air comme mauvaise ou assez mauvaise. Ces résultats suggèrent que, du point de vue subjectif, les participants ne perçoivent pas nécessairement des niveaux de CO₂ de 5000 ppm comme dangereux ou inconfortables. Cependant, il est essentiel de

prendre en compte que la perception subjective de la qualité de l'air peut ne pas refléter pleinement les effets réels sur la santé et la cognition.

Des études mentionnées précédemment, montrent que des niveaux élevés de CO₂ peuvent avoir un impact significatif sur la cognition et les performances. Des niveaux de CO₂ de 2500 ppm et plus ont été associés à des réductions significatives des performances cognitives, de la prise de décision et de la concentration [9, 38].

V. CONCLUSIONS

Il est essentiel de reconnaître que la perception subjective des passagers en ce qui concerne la qualité de l'air à l'intérieur des véhicules peut ne pas refléter pleinement les risques potentiels associés aux niveaux élevés de CO₂. Même si les passagers ne ressentent pas immédiatement des sensations de malaise à 5000 ppm, les preuves scientifiques suggèrent que leur capacité à prendre des décisions, à se concentrer et à maintenir un niveau de performance optimal peut être compromise.

Cela souligne l'importance de fixer des normes de qualité de l'air à l'intérieur des véhicules qui ne se basent pas uniquement sur la perception subjective, mais qui prennent également en compte les données scientifiques sur les effets du CO₂ sur la santé et la cognition. Les constructeurs automobiles et les responsables de la sécurité routière devraient envisager d'intégrer des systèmes de surveillance et de contrôle des niveaux de CO₂ à l'intérieur des véhicules pour garantir à la fois le confort et la sécurité des passagers. Des recherches futures pourraient également explorer des moyens d'éduquer les conducteurs et les passagers sur les risques potentiels associés aux niveaux de CO₂ élevés à l'intérieur des véhicules, afin de les sensibiliser à ces questions importantes pour leur bien-être et leur sécurité.

REFERENCES

- [1] Jou, Rong-Chang, and Tzu-Ying Chen. "Willingness to pay of air passengers for carbon-offset." *Sustainability* 7, no. 3 (2015): 3071-3085.
- [2] Atkinson, Ward J., William Raymond Hill, and Gursaran D. Mathur. *The impact of increased air recirculation on interior cabin air quality*. No. 2017-01-0169. SAE Technical Paper, 2017.
- [3] Pham, Liem, Nick Molden, Sam Boyle, Kent Johnson, and Heejung Jung. "Development of a standard testing method for vehicle cabin air quality index." *SAE International Journal of Commercial Vehicles* 12, no. 2 (2019).
- [4] Jung, Heejung S., Michael L. Grady, Tristan Victoroff, and Arthur L. Miller. "Simultaneously reducing CO₂ and particulate exposures via fractional recirculation of vehicle cabin air." *Atmospheric Environment* 160 (2017): 77-88.
- [5] ANSES. Concentrations de CO₂ dans L'air Intérieur et Effets sur la Santé—De l'agence Nationale de Sécurité Sanitaire de L'alimentation, de L'environnement et du Travail, Maisons-Alfort. 2013.
- [6] GESTIS. Base de Données sur les Substances Dangereuses pour L'assurance Sociale Allemande des Accidents. France, 2013.
- [7] HKEPD (Environmental Protection Department). Practice Note for Managing Air Quality in Air-Conditioned Public Transport Facilities 2015.
- [8] Erdmann, Christine A., and Michael G. Apte. "Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset." (2004).
- [9] Chao, H. Jasmine, Joel Schwartz, Donald K. Milton, and Harriet A. Burge. "The work environment and workers' health in four large office buildings." *Environmental Health Perspectives* 111, no. 9 (2003): 1242-1248.
- [10] Tsai, Dai-Hua, Jia-Shiang Lin, and Chang-Chuan Chan. "Office workers' sick building syndrome and indoor carbon dioxide concentrations." *Journal of occupational and environmental hygiene* 9, no. 5 (2012): 345-351.
- [11] Guais, Adeline, Gerard Brand, Laurence Jacquot, Mélanie Karrer, Sam Dukan, Georges Grévilot, Thierry Jo Molina, Jacques Bonte, Mireille Regnier, and Laurent Schwartz. "Toxicity of carbon dioxide: a review." *Chemical research in toxicology* 24, no. 12 (2011): 2061-2070.
- [12] Laurent, Louis. "INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité. Rapport" Etudes & Recherche" 2017-2018." PhD diss., Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), 2018.
- [13] Olsen, B. W. "Indoor Environment-Health, Comfort and Productivity, Clima Lausanne, 8th REHVA." In *World Congress, Switzerland*. 2005.
- [14] Coley, David A., and Alexander Beisteiner. "Carbon dioxide levels and ventilation rates in schools." *International journal of ventilation* 1, no. 1 (2002): 45-52.
- [15] Chiu, Chun-Fu, Ming-Hung Chen, and Feng-Hsiang Chang. "Carbon dioxide concentrations and temperatures within tour buses under real-time traffic conditions." *PLoS One* 10, no. 4 (2015): e0125117.
- [16] Allen, Joseph G., Piers MacNaughton, Usha Satish, Suresh Santanam, Jose Vallarino, and John D. Spengler. "Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments." *Environmental health perspectives* 124, no. 6 (2016): 805-812.
- [17] Bierwirth, P. N. "Carbon dioxide toxicity and climate change: a major unapprehended risk for human health." *Web Published: ResearchGate* 10 (2018).
- [18] Satish, Usha, Mark J. Mendell, Krishnamurthy Shekhar, Toshifumi Hotchi, Douglas Sullivan, Siegfried Streufert, and William J. Fisk. "Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance." *Environmental health perspectives* 120, no. 12 (2012): 1671-1677.
- [19] Kajtar, L., L. Herczeg, E. Lang, T. Hrustinszky, and L. Banhidi. "Influence of carbon-dioxide pollutant on human well-being and work intensity." In *Healthy buildings*, vol. 1, pp. 85-90. Porto: Universidade do Porto, 2006.
- [20] Kajtar, L., L. Herczeg, and E. Lang. "Examination of influence of CO₂ concentration by scientific methods in the laboratory." (2003).
- [21] Wargocki, Pawel, David P. Wyon, G. Clausen, and P. O. Fanger. "The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity." (2000).
- [22] Grady, Michael L., Heejung Jung, Yong chul Kim, June Kyu Park, and Bock Cheol Lee. *Vehicle cabin air quality with fractional air recirculation*. No. 2013-01-1494. SAE Technical Paper, 2013.
- [23] Knibbs, L. D., deDear, R., & Atkinson, S. E. (2009). Field study of air change and flow rate in six automobiles. *Indoor air*, 19(4), 303-313.
- [24] San Tam, W. W.; Wong, T. W.; Wong, A. H. Association between air pollution and daily mortality and hospital admission 613 due to ischaemic heart diseases in Hong Kong. *Atmospheric Environment* 2015, 120, 360-368.
- [25] Grady, Michael L., Heejung Jung, Yong chul Kim, June Kyu Park, and Bock Cheol Lee. *Vehicle cabin air quality with fractional air recirculation*. No. 2013-01-1494. SAE Technical Paper, 2013.
- [26] Li, Chengguo, Eli Brewer, Liem Pham, and Heejung Jung. "Reducing mobile air conditioner (MAC) power consumption using active cabin-air-recirculation in a plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)." *World Electric Vehicle Journal* 9, no. 4 (2018): 51.
- [27] Wang, Juan, and Dan Norbäck. "Subjective indoor air quality and thermal comfort among adults in relation to inspected and measured indoor environment factors in single-family houses in Sweden-the BETSI study." *Science of the Total Environment* 802 (2022): 149804.
- [28] Fang, Lei, Geo Clausen, and P. Ole Fanger. "Temperature and humidity: important factors for perception of air quality and for ventilation requirements." (2000).
- [29] Kakoulli, Christina, Alexis Kyriacou, and Michalis P. Michaelides. "A review of field measurement studies on thermal comfort, indoor air quality and virus risk." *Atmosphere* 13, no. 2 (2022): 191.