

ภาพรวมของประสิทธิภาพการแทรกซึมผ่านหน้ากาก: กลไกการแทรกซึมทะลุผ่านของละอองลอย (An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration)

[A. Tcharkhtchi](#),^a [N. Abbasnezhad](#),^{a,b} [M. Zarbini Seydani](#),^b [N. Zirak](#),^b [S. Farzaneh](#),^c and [M. Shirinbayan](#)^{a,b,*}

1. บทนำ (Introduction)

ในขณะนี้เรากำลังใช้ชีวิตอยู่ในช่วงเวลาที่โควิด 19 ได้ก่อให้เกิดการติดเชื้อในผู้คนมากกว่า 2.5 ล้านคนและมีผู้ที่เสียชีวิตจากโรคนี้มากกว่า 300,000 รายแล้วทั่วโลก เพื่อที่จะปกป้องประชากรในสถานการณ์เช่นนี้ทางออกที่มีประสิทธิภาพอย่างหนึ่งในการป้องกันแต่ละบุคคลก็คือการใช้หน้ากากที่มีประสิทธิภาพสูง จริง ๆ แล้ววัตถุประสงค์หลักของการใช้หน้ากากก็คือเพื่อที่จะป้องกันการหายใจเข้าและดักจับอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศ (ทั้งที่เกิดเองโดยธรรมชาติหรือที่เกิดขึ้นโดยน้ำมือมนุษย์) รวมทั้งจุลินทรีย์สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กต่าง ๆ (เช่น แบคทีเรีย ไวรัส หรือ เชื้อรา) อนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศที่เกิดในธรรมชาติ (เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ พายุฝุ่น ไฟฟ้าที่เกิดเองโดยธรรมชาติ) และที่เกิดขึ้นโดยน้ำมือมนุษย์ (เช่น มลพิษจากอุตสาหกรรม) มีขนาดเล็กมาก ๆ ผลการศึกษารวบรวมหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่รุนแรงของการหายใจรับเอาอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ ต่อการเกิดโรคทางเดินหายใจตลอดจนโรคหัวใจและหลอดเลือด การหายใจรับเอาอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ เหล่านี้ (อนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน) ยังเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตจำนวนประมาณ 8.9 ล้านคนในปี พ.ศ. 2558 นอกเหนือจากอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ ที่ลอยอยู่ในอากาศเหล่านี้แล้วยังมีละอองลอยชีวภาพที่เป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพซึ่งการศึกษารวบรวมจำนวนมากให้ความสนใจ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเหล่านี้อาจจะเป็สาเหตุของความเสียหายต่อสุขภาพ การปกป้องจากจุลินทรีย์ที่ทำให้ติดเชื้อจึงมีความสำคัญมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาวิจัยในความพยายามที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของการปกป้องจากเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้

การมีหน้ากากที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น สวมใส่ได้สะดวกสบายรวมทั้งมีประสิทธิภาพสูงในการกักจับละอองลอยชีวภาพและป้องกันการแทรกซึมผ่านของอนุภาคที่ลอยในอากาศ นับเป็นเป้าหมายอย่างหนึ่งของการศึกษาวิจัยในแขนงนี้อยู่เสมอมา ด้วยวัตถุประสงค์นี้จึงมีการมุ่งเน้นไปที่ปัจจัยองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกำหนดคุณภาพของหน้ากากให้มีการปรับปรุงเพิ่ม

ประสิทธิภาพของหน้ากาก โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการกรองของหน้ากากเป็นผลมาจากสเปคของตัวกรองและจากปัจจัยภายนอก

สเปคของตัวกรองในหน้ากากรวมถึงคุณสมบัติประจำตัวของวัสดุที่ใช้ทำหน้ากาก เช่น องค์ประกอบทางเคมีของตัวกรองและลักษณะเฉพาะตัว เช่น ความหนาและความหนาแน่นของการบรรจุเส้นใยในตัวกรอง เป็นต้น นอกจากนี้การศึกษาวิจัยยังได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของปัจจัยภายนอกต่าง ๆ เช่น ความเร็วลมหน้าหน้ากาก (face velocity) หรือการไหลของอากาศ รูปแบบของการไหลของอากาศที่สม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ สถานะการประจุของอนุภาค ความถี่ในการหายใจ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ตลอดจนช่วงระยะเวลาในการกรอง (loading time) ของหน้ากากนั้น

เนื่องจากปัจจัยภายนอกมีผลที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพการกรองและกำหนดกลไกของการกรอง ดังนั้นความเป็นไปได้ในการที่จะเพิ่มหรือปรับปรุงการออกแบบและประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในกลไกเหล่านี้เสียก่อน การตรวจสอบกลไกและความเข้าใจที่กระจ่างแจ้งในการที่อนุภาคต่าง ๆ เข้าสู่ร่างกายผ่านทางหน้ากากจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่น่าสนใจในเรื่องนี้ การแทรกซึมผ่านหน้ากาดังอยู่บนรากฐานของกลไกต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยการตกตะกอนจากแรงโน้มถ่วงของโลก การชนหรือตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย การสกั๊ดกัน การแพร่กระจาย ตลอดจนแรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิต และการสะท้อนความร้อน ประสิทธิภาพโดยรวมของตัวกรองถูกกำหนดโดยการเพิ่มประสิทธิภาพต่ออิทธิพลของกลไกการแทรกซึมผ่าน ดังนั้นบทบาทของกลไกการแทรกซึมผ่านของอนุภาคแต่ละอย่างจึงจะต้องได้รับการพูดถึงเป็นอันดับแรก

ในทางตรงกันข้ามการจำลองและความเข้าใจในกลไกการทะลุผ่านของละอองชีวภาพเข้าไปในหน้ากาก็มีความสำคัญอย่างมาก สิ่งนี้มีความสำคัญขึ้นมาเมื่ออนุภาคที่ปนเปื้อนและจุลินทรีย์มาถึงพื้นผิวด้านนอกของหน้ากาก ถ้าหากว่าพื้นผิวของหน้ากากไม่สามารถทำลายเชื้อไวรัสหรือจุลินทรีย์ที่ตกลงบนพื้นผิวของหน้ากากนั้นได้ อนุภาคที่ปนเปื้อนเหล่านั้นก็จะสามารถทะลุผ่านหน้ากากโดยผ่านทางกลไกหลายอย่าง เช่น การแทรกซึมผ่านแบบรากลอยของต้นไม้ เป็นต้น

ยิ่งไปกว่านั้นหน้ากาก็กลายเป็นตัวเก็บสะสมเชื้อไวรัสในระหว่างที่ทำการกิจกรรมที่มีการหายใจเข้า ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพื้นผิวด้านนอกของหน้ากากมีการสัมผัสติดต่อกับละอองฝอยที่ปนเปื้อนเชื้อโรค โดยที่เชื้อไวรัสและแบคทีเรียจะตกค้างอยู่ที่พื้นผิวของหน้ากากและในตัวหน้ากากในระหว่างที่สวมใส่หน้ากากนั้นเป็นเวลานาน จึงเป็นสิ่งที่อันตรายอย่างชัดเจนและไม่พึงประสงค์ ถ้าหากว่าเชื้อเหล่านั้นสามารถมีชีวิตรอดอย่างปลอดภัยและยังคงต้นตัวในสภาวะแวดล้อมน้อย ๆ ที่อบอุ่นและชื้นภายในหน้ากาก เนื่องจากสภาพเงื่อนไขของหน้ากากรวมทั้งความชื้นและอุณหภูมิที่สูงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างวงจรการหายใจ มันก็จะนำไปสู่การเกิดไอน้ำภายในหน้ากาก และกระบวนการนี้ก็จะเป็นตัวเร่งกลไกของการทะลุผ่านและการแพร่กระจายของจุลินทรีย์อย่างรวดเร็วไปยังส่วนในของหน้ากาก มีการจำลองและการศึกษาวิจัยมากมายที่พิจารณาปรากฏการณ์นี้ว่าเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ในการถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุที่มีรูพรุน

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงสิ่งที่ไม่คาดคิดเช่นนี้ จึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์กลไกการแพร่กระจายของอนุภาคชีวภาพและอนุภาคประเภทอื่น ๆ ในหน้ากาก และในการติดตามตรวจสอบการออกแบบและการใช้ประโยชน์จากหน้ากากที่สอดคล้องกับกลไกเหล่านั้น การศึกษาวิจัยนี้ดำเนินการโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะตรวจสอบกลไกของการกรองอนุภาคของหน้ากากและตรวจสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผล เช่น ความเร็วลมหน้าหน้ากากหรือการไหลของอากาศ รูปแบบของการไหลของอากาศที่สม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ สถานะการประจุของอนุภาค ความถี่ในการหายใจ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ตลอดจนช่วงระยะเวลาในการกรองของหน้ากากนั้น

2. หน้ากากประเภทต่าง ๆ (Different types of masks)

ต่อไปนี้จะพูดถึงประเภทต่าง ๆ ของหน้ากากรวมทั้งข้อดีและข้อด้อยของหน้ากากเหล่านั้นด้วย

2.1. หน้ากากชนิดสวมปิดปากและจมูก (Face masks)

หน้ากากประเภทนี้ซึ่งสวมปิดจมูกและปากของผู้สวมใส่ใช้เป็นตัวกันทางกายภาพสำหรับกันของเหลวและอนุภาคฝุ่นละอองที่มีประสิทธิภาพระดับหนึ่ง หน้ากากประเภทนี้สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่:

2.1.1. หน้ากากผ้าธรรมดา (Basic cloth face mask)

หน้ากากประเภทนี้เป็นหน้ากากชนิดที่เรียบง่ายที่สุดซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงเวลาที่มีการระบาดของอย่างรุนแรงของโรคระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากขาดแคลนหรือไม่สามารถจัดหาหน้ากากชนิดที่มีตัวกรองได้ บางคนก็อาจจะชอบใช้ผลิตภัณฑ์จากผ้ามากกว่าในการป้องกันโรคระบบทางเดินหายใจ ภาพที่ 1 แสดงถึงหน้ากากผ้าธรรมดา



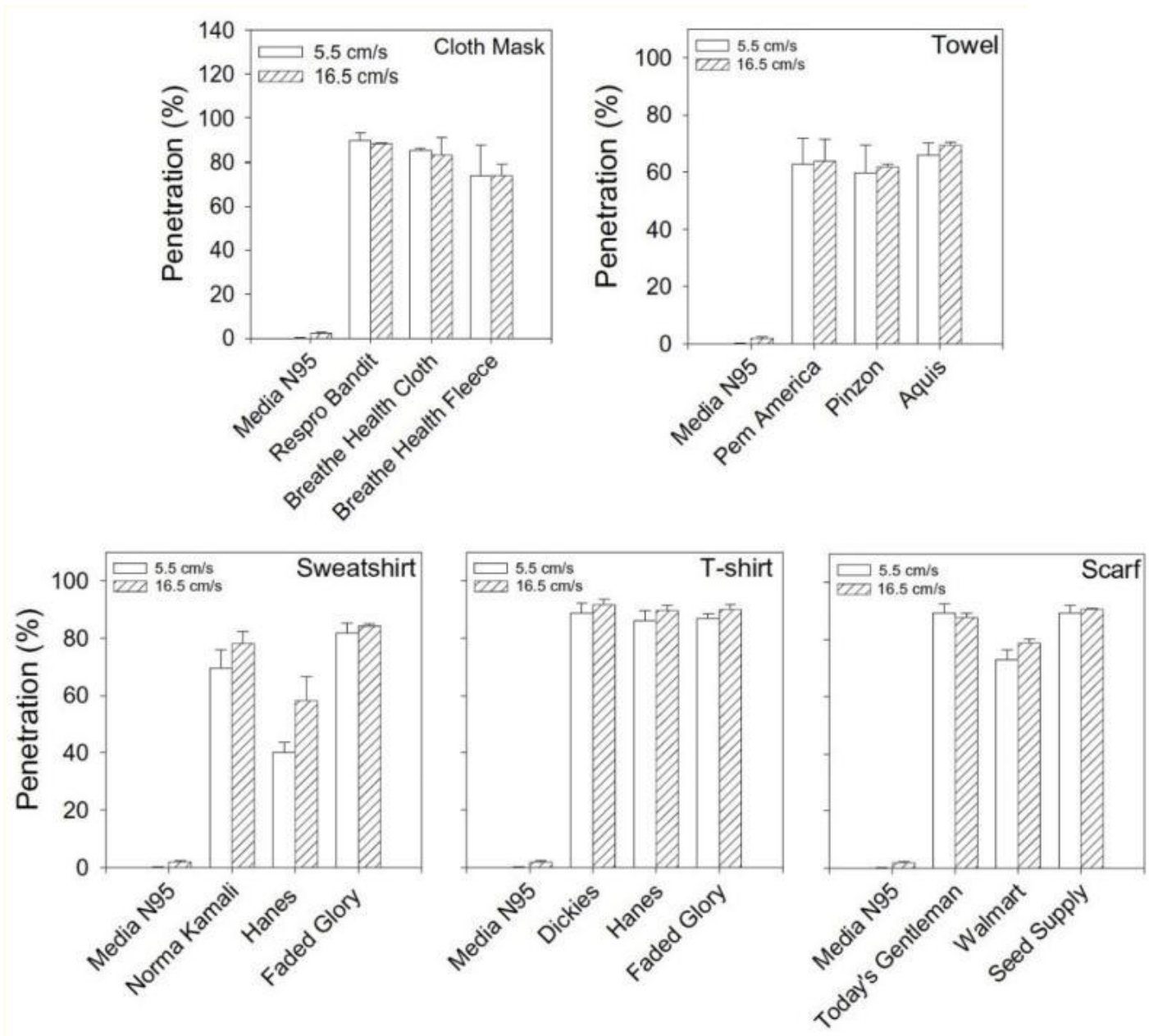
ภาพที่ 1 หน้ากากผ้าธรรมดา

ในการศึกษาโดยเรกาสมีและคณะ [17] คณะผู้วิจัยได้ศึกษาความสามารถในการแทรกซึมทะลุผ่านของละอองลอยในวัสดุที่ทำจากผ้าประเภทต่าง ๆ 5 ประเภทด้วยกันได้แก่ เสื้อยืดแขนยาวชนิดคลุมศีรษะ เสื้อยืดธรรมดา ผ้าขนหนู ผ้าพันคอ และหน้ากากผ้า เปรียบเทียบกับความสามารถในการกรองของตัวกรองในหน้ากากชนิด N95 การทดสอบทำกับละอองลอยชนิด polydisperse และชนิด monodisperse ขนาดต่าง ๆ กันระหว่างประมาณ 20 – 1000 นาโนเมตร ของอนุภาคเกลือแกงที่มีค

ความเร็วหน้าหน้ากาก 2 ระดับ คือ 5.5 เซนติเมตรต่อวินาที และ 16.5 เซนติเมตรต่อวินาที นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้สรุปว่าความสามารถในการทะลุผ่านของอนุภาคในวัสดุเหล่านี้สูงกว่าในหน้ากากชนิด N 95 (ภาพที่ 2) [17] อย่างมาก เราสามารถสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของละอองลอย (P) คือสัดส่วนของความเข้มข้นของละอองลอย downstream (C_{Down}) ต่อความเข้มข้นของละอองลอย challenge (C_{chal}):

$$P(\%) = C_{Down} / C_{Chal} \times 100$$

สมการที่ 1



ภาพที่ 2 ความสามารถในการทะลุผ่านของละอองลอยเกลือแกงชนิด polydisperse ในวัสดุ (a) หน้ากากผ้าธรรมดา (b) ผ้าขนหนู (c) เสื้อยืดแขนยาวชนิดคัลมตีระ (d) เสื้อยืดธรรมดา และ (e) ผ้าพันคอ ที่ความเร็วหน้าหน้ากาก 2 ระดับ

เปรียบเทียบกับหน้ากากชนิด N 95 ความคลาดเคลื่อนของแท่งกราฟ (Error bars) มีระดับความน่าเชื่อถือ (trust level) อยู่ที่ 95% [17]

2.1.2. หน้ากากอนามัย (Surgical face mask)

เริ่มแรกหน้ากากอนามัย (ภาพที่ 3) ได้รับการออกแบบขึ้นมาเพื่อปกป้องผู้สวมใส่จากละอองฝอยที่ติดเชื้อในสภาวะแวดล้อมทางคลินิก แต่ก็ไม่ได้ช่วยมากนักในการป้องกันการแพร่กระจายของโรคติดเชื้อระบบทางเดินหายใจ [4,18,21] ในขณะที่หน้ากากชนิดนี้ไม่ใช่เครื่องมือที่ปกป้องได้อย่างสมบูรณ์ แต่ก็สามารถป้องกันผู้สวมใส่จากการกระจายของของเหลว เช่น จากการไอจามและสามารถดักจับแบคทีเรียในละอองฝอยและละอองลอยของของเหลวมิให้เข้าสู่ปากและจมูกได้ [22] หน้ากากอนามัยที่ซื้อขายกันโดยทั่วไปมีโครงสร้าง 3 ชั้นโดยที่ชั้นกลางจะเป็นตัวกรองในขณะที่ชั้นในทำหน้าที่ดูดซับความชื้นและชั้นนอกมีคุณสมบัติกันน้ำ [23] อย่างไรก็ตามหน้ากากแบบ planar นี้มีการปกป้องในระดับต่ำและจำเป็นจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบระหว่างความรู้สึกสวมใส่สบายกับระดับของการปกป้องเมื่อต้องเลือกใช้หน้ากากชนิด planar นี้ในสภาพอากาศที่ปนเปื้อนมลพิษ [23]



ภาพที่ 3

หน้ากากอนามัย [20]

ในการศึกษาวิจัยโดยมิลตันและคณะ [24] คณะผู้ศึกษาวิจัยได้ตรวจสอบผลของการใช้หน้ากากอนามัยในการป้องกันการแพร่กระจายของละอองลอยใช้หวัดใหญ่ ผลที่ได้บ่งชี้ว่าหน้ากากอนามัยป้องกันการแพร่กระจายของละอองลอยชนิดหยาบได้ 25 เท่าและละอองลอยชนิดละเอียดได้ 2.5 เท่า เพราะฉะนั้นโดยทั่ว ๆ ไปจึงสามารถลดปริมาณละอองลอยที่หายใจออกมาได้ 3.4 เท่า ผลที่ตามมาก็คือหน้ากากอนามัยสามารถจำกัดการปล่อยละอองฝอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน ด้วยเหตุนี้จึงไม่เพียงพอในการที่จะจำกัดการปล่อยละอองฝอยที่มีขนาดเล็ก [24] อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยชิ้นอื่น ๆ ในเรื่องประสิทธิภาพของหน้ากากอนามัยและหน้ากากชนิด N95 (ข้อที่ 2.2.1) ได้เปิดเผยว่าไม่มีความ

แตกต่างที่มีนัยสำคัญระหว่างหน้ากากอนามัยและหน้ากากชนิด N95 ถึงแม้ว่าวิธีการทางสถิติมีความครอบคลุมเพียงพอในการให้ขนาดของอิทธิพลปานกลาง (moderate influence sizes) แล้วก็ตาม [25,26] โดยทั่วไปอ้างกันว่าไม่มีการศึกษาวิจัยที่เพียงพอในการสนับสนุนเรื่องประสิทธิภาพของหน้ากากอนามัยในการลดความเสี่ยงของการติดเชื้อ [25,27]

2.1.3. กระจกป้องกันใบหน้าแบบเต็มหน้า (Full-length face shield)

เป็นอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบาและราคาถูก ซึ่งประกอบด้วยที่คาดศีรษะแบบมียางยืดและกระจกพลาสติกโพลีเมอร์แข็งใสชนิดเต็มใบหน้า โดยส่วนใหญ่กระจกใสจะทำมาจากพลาสติกชนิดโพลีคาร์บอเนต (หรือพีซี) ทำหน้าที่เสมือนเป็นโล่ปกป้องส่วนใบหน้าจากการสัมผัสโดยตรงกับของเหลวระหว่างการพูดคุย การไอจาม [28,29] กระจกป้องกันใบหน้าแบบเต็มหน้าแสดงไว้ใน ภาพที่

4



ภาพที่ 4

กระจกป้องกันใบหน้าแบบเต็มหน้า

2.2. หน้ากากกรองอากาศ (Filtering facepiece respirator)

หน้ากากกรองอากาศเป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่สวมใส่ปิดจมูกและปากเพื่อป้องกันอนุภาคในอากาศ เช่น ฝุ่น เชื้อโรค แก๊ส ไอ [18,30]

หน้ากากกรองอากาศช่วยในการฟอกอากาศและดังนั้นจึงสามารถลดความเสี่ยงการปนเปื้อนกับอากาศที่มีมลพิษได้

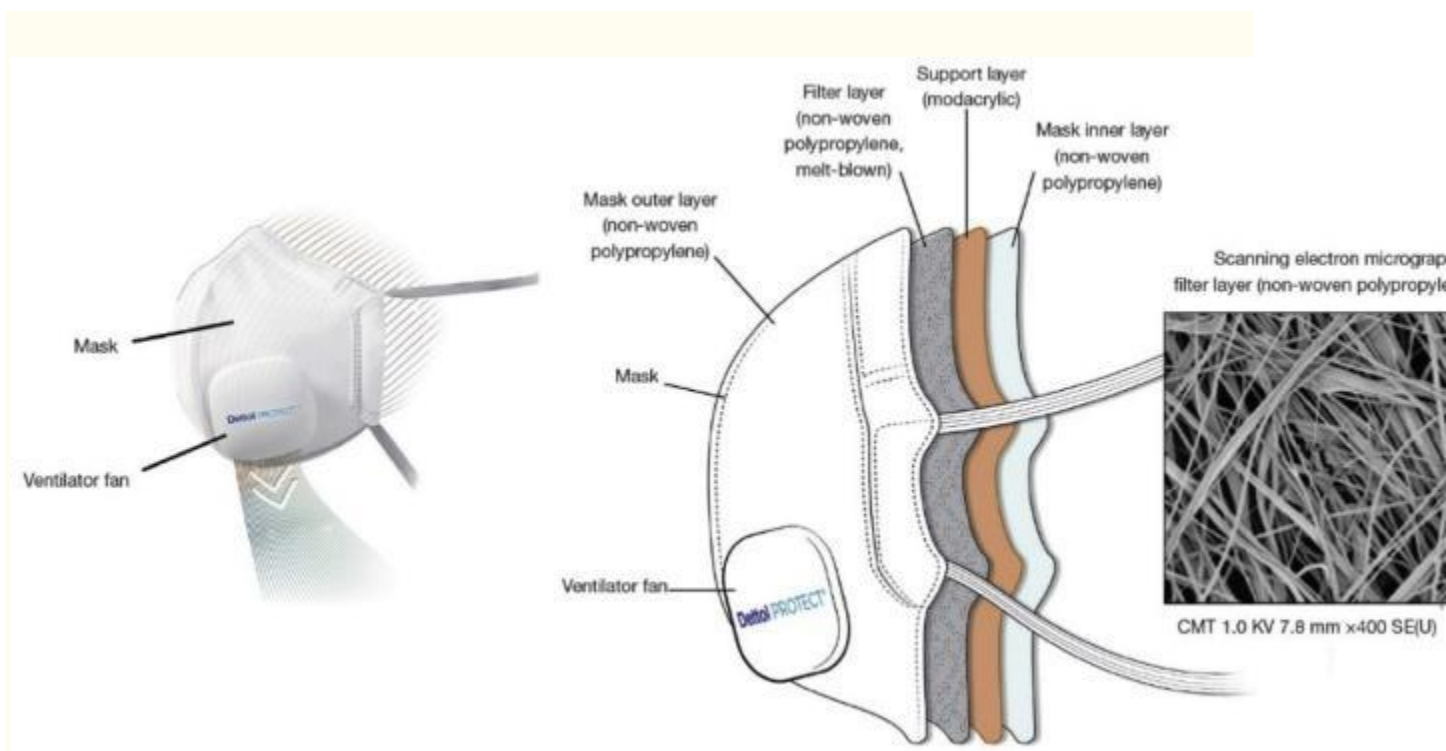
ที่ทำงานส่วนใหญ่เลือกใช้หน้ากากกรองอากาศ (FFRs) โดยอ้างถึงการที่สามารถเข้าถึงได้ มีราคาไม่แพงและใช้แล้วทิ้งได้ มีงานศึกษาวิจัยหลายชิ้นที่อนุมัติยอมรับในระดับการกรองของหน้ากากกรองอากาศสำหรับละอองลอยชนิด monodisperse และชนิด polydisperse ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า

20 นาโนเมตร [10,31], [32], [33] หน้ากากประเภทนี้มีหลายชนิดต่าง ๆ กัน เช่น ชนิด N95 ชนิด P100 ชนิด FFP2 ชนิด FFP3 และชนิด KN95 เป็นต้น ในที่นี้เราจะพูดถึง 2 ชนิดที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุด คือ ชนิด N95 และชนิด P100

2.2.1. หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 (N95 respirator)

หน้ากากกรองอากาศชนิดนี้ไม่กันน้ำมัน บางทีก็รู้จักกันว่าเป็นตัวกรองอิเล็กโตรท คำว่า N95 มีที่มาจากความจริงที่ว่าหน้ากากชนิดนี้สามารถกรองละอองลอยที่มีขนาดประมาณ 0.3 ไมครอนได้อย่างน้อย 95% [34]

ในการศึกษาวิจัยโดยเบลลชีและคณะ [27] คณะผู้วิจัยได้แสดงว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 อาจจะไม่ได้ให้ความปลอดภัยอย่างเพียงพอเสมอไปในการกรองอนุภาคละอองลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 300 นาโนเมตร ดังนั้นประสิทธิภาพในการปกป้องของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 บางชิ้นอาจจะต่ำกว่า 95% ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่มีอัตราการหายใจเข้าสูง ๆ [27] ควรจะกล่าวว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่ผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตต่างกันก็มีประสิทธิภาพต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ทะลุผ่าน [31] ภาพที่ 5 แสดงลักษณะของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และชั้นต่าง ๆ ของหน้ากากชนิดนี้



ภาพที่ 5

ลักษณะของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และชั้นต่าง ๆ ของหน้ากากชนิดนี้ [35].

หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ก็มีหลายแบบต่าง ๆ กัน เช่น หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่ใช้ในทางการแพทย์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 แบบมาตรฐานทั่วไป จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ประกอบด้วย 4 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นใน ชั้นรองรับ ชั้นตัวกรอง และชั้นนอกสุด นอกจากนี้ก็ยังมีพัดลมระบายอากาศฝังติดอยู่กับชั้นนอกของตัวหน้ากากเพื่อช่วยให้สามารถหายใจได้สะดวกขึ้น

2.2.2. หน้ากากกรองอากาศชนิด P100/หน้ากากป้องกันแก๊สพิษ (P100 respirator/gas mask)

หน้ากากกรองอากาศชนิดนี้สามารถกันน้ำมันได้ดี สามารถกรองอนุภาคละอองลอยได้ประมาณ 99.97% มีงานศึกษาวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาประสิทธิภาพเปรียบเทียบกันระหว่างหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และหน้ากากกรองอากาศชนิด P100 ซึ่งผลการศึกษารวบรวมว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนักในด้านการแทรกซึมผ่านก่อนหน้าการออกกำลังกาย ในขณะที่ผลที่ได้หลังจากการออกกำลังกายพบว่าการใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด P100 ทำได้สะดวกกว่า แต่ถึงอย่างไรหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ก็ไม่ผ่านเกณฑ์หลังการออกกำลังกาย นอกจากนี้ยังพบว่าเนื่องจากการที่หน้ากาอาจจะมีการผนึกอากาศแบบซีตใบหน้า การหายใจทำได้ลำบาก และการเก็บความชื้นในระหว่างการออกกำลังกายหรือทำงานหนักทำให้มีความเสี่ยงในการที่หน้ากามีการเปลี่ยนแปลงรูปได้ ในแง่นี้หน้ากากกรองอากาศชนิด P100 ซึ่งมีความแข็งแรงรูปมากกว่าสามารถคงรูปได้ในสภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 [36] ประสิทธิภาพในด้านนี้ได้รับการพิสูจน์ยืนยันจากงานศึกษาวิจัยหลายชิ้น ซึ่งผลจากการทดลองในสภาวะการไหลของอากาศที่มีปริมาตรสูงแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยในการแทรกซึมทะลุผ่านสำหรับหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และชนิด P100 อยู่ที่ 2 และ 0.03% ตามลำดับ [37]

2.2.3. เครื่องช่วยหายใจหรือ SCBA (self-contained breathing apparatus)

เครื่องช่วยหายใจ (SCBA) โดยปรกติจะประกอบไปด้วยหน้ากาก (facepiece) ซึ่งติดอยู่กับถังจ่ายอากาศ (เช่น อากาศเหลว ออกซิเจนเหลว หรือสารเคมีที่ผลิตออกซิเจน) ซึ่งผู้ใช้นำติดตัวไปโดยผ่านท่ออ่อนและเรกกูเลเตอร์ เฉพาะเครื่องช่วยหายใจชนิดแรงดันบวกเท่านั้นที่ได้รับการแนะนำให้ใช้ในสถานการณ์ที่เสี่ยงต่อความปลอดภัยในชีวิต โดยทั่วไปเครื่องช่วยหายใจเป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลอย่างหนึ่งสำหรับพนักงานดับเพลิง ดังนั้นหน้ากากประเภทนี้จึงควรใช้ในสภาพอากาศที่มีฝุ่นควัน เครื่องช่วยหายใจสามารถช่วยปกป้องจากสารมลพิษในอากาศบางอย่างได้ อย่างไรก็ตามปริมาณอากาศที่มีอยู่จำกัดและอัตราการใช้งานเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเตรียม [38]

เครื่องช่วยหายใจชนิดเข้าไปแล้วหลีกเลี่ยง (entry-and-escape SCBA respirators) ทำให้ลูกจ้างสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วในที่ทำงานแต่ก็เป็นอุปกรณ์ขัดขวางความคล่องตัวของพนักงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่แคบ ๆ หรือพื้นที่จำกัด เนื่องมาจากความทะอะทะและน้ำหนักของตัวอุปกรณ์ จึงแนะนำให้ใช้ในกรณีที่ทำงานกับสารมลพิษในอากาศที่ไม่มีการระบุชนิดและจำนวน หน้ากากประเภทนี้สามารถป้องกันอนุภาคของสารพิษและอนุภาคที่มีอันตรายใด ๆ จากอากาศภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ [39,40]

2.2.4. เครื่องช่วยหายใจแบบเต็มหน้า (Full face respirator)

เครื่องช่วยหายใจแบบเต็มหน้าประกอบไปด้วยแผ่นพลาสติกแข็งซึ่งมีส่วนที่โปร่งใสสำหรับการมองเห็นและส่วนตรงกลาง (central port part) ซึ่งอยู่ใต้ส่วนช่องมองเห็น (view part) หน้ากากประเภทนี้กำหนดให้ใช้สำหรับการบำบัดรักษาปัญหาเกี่ยวกับการหายใจและการหลับยาก (เช่น ภาวะหยุดหายใจขณะหลับ) โดยการให้อากาศที่เหมาะสมแก่การหายใจแก่ผู้ป่วย ส่วนที่สัมผัสติดกับใบหน้าจะเป็นวัสดุที่อ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นได้ซึ่งสามารถปิดเข้ากันได้ดีกับโครงหน้าต่าง ๆ กันได้ทุกแบบ และมีสายรัดคาดศีรษะผู้สวมใส่หน้ากาก สายรัดคาดศีรษะนี้ได้รับการออกแบบให้มีแรงมากพอในการยึดตัวหน้ากากเข้ากับใบหน้าเพื่อให้เกิดการผนึกอากาศระหว่างหน้ากากกับใบหน้า

อย่างไรก็ตามการกำหนดรูปร่างลักษณะของหน้ากากชนิดนี้อาจจะเกิดปัญหาในกรณีที่ผู้สวมหน้ากากเข้าสู่โหมดนอนหลับ (sleeping mood) ซึ่งหน้ากากจะถูกคลายให้หลวมและจะมีผลกระทบต่อการผนึกอากาศระหว่างหน้ากากกับใบหน้า ในกรณีของปัญหาระบบการหายใจ เช่น ภาวะหยุดหายใจขณะหลับ การรั่วไหล (leakage) เช่นนี้จะทำให้สูญเสียแรงดันอากาศซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษา ทำให้การบำบัดรักษามีประสิทธิภาพลดลง [41]

2.3. การเปรียบเทียบหน้ากากชนิดต่าง ๆ กัน (Comparison of different masks)

ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ว่าด้วยหน้ากากผ้า เรกาสมีและคณะ [17] ได้ระบุว่าการแทรกซึมทะลุผ่านสำหรับหน้ากากผ้ามีมากกว่าในหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 หมายถึงการสวมหน้ากากผ้าไม่ค่อยมีผลสักเท่าใดนัก เครียนและคณะ [31] ได้กล่าวถึงหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากกรองอากาศชนิดที่กรองฝุ่น/หมอกและชนิดที่กรองฝุ่น/ควัน/หมอกและดีกว่าหน้ากากอนามัยที่ไม่ได้รับการรับรอง ผลจากการเปรียบเทียบหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และชนิด P100 ก่อนการออกกำลังกายพบว่ามีผลไม่ต่างกัน

ในทางกลับกันผลที่ได้หลังการออกกำลังกายพบว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด P100 เป็นที่ยอมรับได้มากกว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 [35] เบลาชีและคณะ [27] ได้กล่าวถึงหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ว่าอาจจะไม่สามารถให้ความปลอดภัยอย่างเพียงพอไปต่อการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคละอองลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 300 นาโนเมตร สรุปได้ว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และหน้ากากอนามัยสามารถป้องกันอนุภาคในอากาศได้เทียบเท่ากันตามที่ได้รับการรายงานในบางกรณี [20,42] ลีและคณะ [43] แสดงให้เห็นว่าการแทรกซึมผ่านของอากาศและไอน้ำสำหรับในหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 มีต่ำกว่าในหน้ากากอนามัยแต่ก็สวมใส่ไม่สบายเท่าหน้ากากอนามัยลองและคณะ [44] รายงานว่าการใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ก็ไม่ได้มีความปลอดภัยมากกว่าการใช้หน้ากากอนามัยในการป้องกันความเสี่ยงจากเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่ที่ได้รับการยืนยันจากห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังไม่แนะนำให้ใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 สำหรับผู้คนทั่วไปรวมทั้งบุคลากรทางการแพทย์ที่ไม่มีความเสี่ยงสูงไม่ได้มีการสัมผัสติดต่อใกล้ชิดกับผู้ป่วยไข้หวัดใหญ่หรือผู้ที่สงสัยว่าเป็นไข้หวัดใหญ่ เคยมีการระบุถึงหน้ากากอนามัยที่มีชั้นของหน้ากากเป็นชนิด electrothermal layers อาจจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 หรือหน้ากากอนามัยทั่ว ๆ ไปสำหรับในกรณีเด็ก [42] ดังและคณะ [45] ได้รายงานว่าหน้ากากที่ผลิตจากโพลีโพรพิลีนที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษมีกาวสังเคราะห์บริเวณขอบหน้ากากมีประสิทธิภาพสูงกว่าหน้ากากอนามัยแบบมาตรฐาน และหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 โดยสรุป เราได้แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ และประสิทธิภาพของหน้ากากชนิดต่าง ๆ ไว้ใน [ตารางที่ 1](#)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบหน้ากากชนิดต่าง ๆ

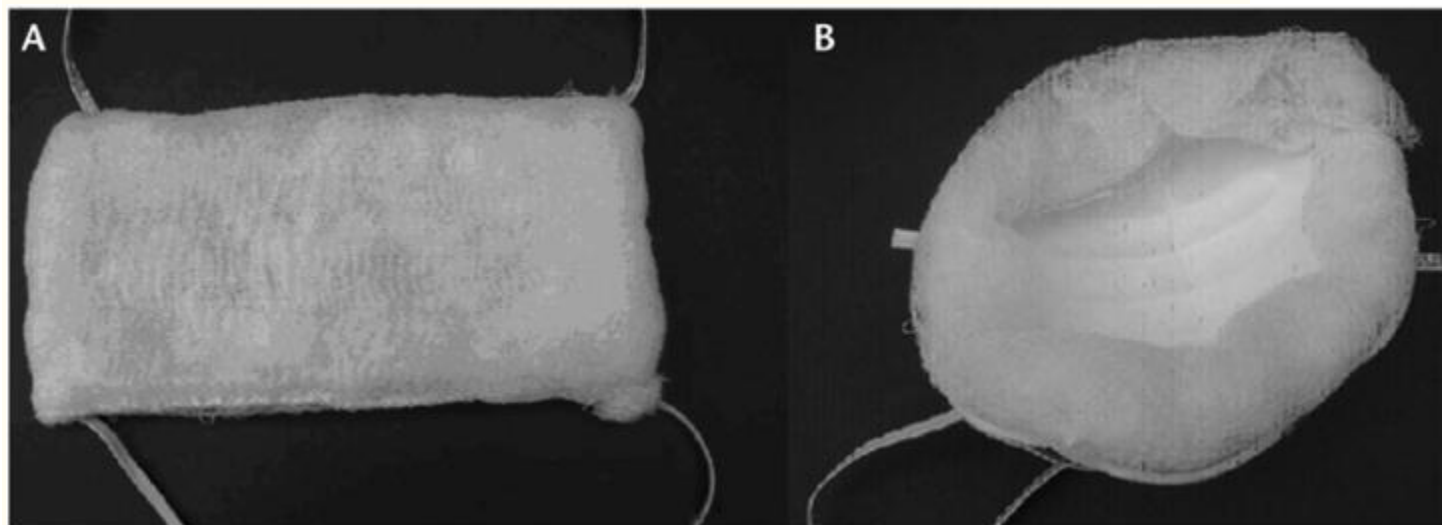
Mask type	Affordable	Efficiency	Sealing and fitting	Light weight	Comfortable	Respiratory filter	Reusable	Mobility	Durability	Difficult to breath	Eye protection
Basic cloth face mask	High	Low	Low	High	High	No	Yes	High	Moderate	Moderate	No
Surgical face mask	High	Moderate	Low	High	High	No	No	high	Low	Moderate	No
Full-length face shield	High	Moderate, low for indirect aerosols	Low	high	Moderate	No	Yes	High	Moderate	Low	Yes
N95	High-Moderate	High	Moderate	High	High	Yes	No (not suitable for washing)	High	Low	High	No
P100 respirator	Low	High	High	Moderate	Moderate	Yes	Yes	Low	High	Low	Yes/No
Self-contained breathing apparatus	Low	Excellent	Excellent	Low	Moderate	Yes	Yes	Low	High	Low	Yes
Full face respirator	Low	Excellent	Excellent	Low	Low	Yes	Yes	Low	High	Low	Yes

3. โพลีเมอร์ที่ใช้ในหน้ากาก (Polymers used in masks)

โพลีเมอร์ที่ปรกติใช้เป็นส่วนประกอบของเส้นใยในหน้ากากได้แก่ โพลีโพรพิลีน โพลีเอทิลีน โพลีเอสเตอร์ โพลีเอไมด์ โพลีคาร์บอเนต โพลีฟีนอลออกไซด์ นอกจากนี้ก็ยังมีการใช้โพลีเมอร์บางชนิดที่มีส่วนผสมของฟลูออรีนด้วย เช่น ไตรฟลูออโรคลอโรเอทิลีน เป็นต้น

สังเกตได้ว่าโพลีเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกที่ไม่ดูดซับน้ำซึ่งผิวสัมผัสมีความลื่นดูจะสวมใส่สบายกว่า [46] เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่ดูดซับน้ำไม่ดูดซับความชื้นนี้เองเส้นใยโพลีโพรพิลีนจึงถูกใช้ในการทำหน้ากากทางการแพทย์ทั่วไป [47] ฮวงและคณะ [48] กล่าวว่าโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของหน้ากากก็คือเส้นใยโพลีโพรพิลีน (พีพี) ที่ได้รับการปรับปรุง

เพิ่มเติมโดยสารไดเมทิลไดออกทาเดซิลแอมโมเนียมโบรไมด์เพื่อให้มีประจุไฟฟ้าบวกซึ่งสามารถดึงดูดแบคทีเรีย [45] [ภาพที่ 6](#) แสดงภาพของหน้ากากอนามัยสองชนิดที่ใช้เส้นใยโพลีพรพิลีนและฉนวนโพลีพรพิลีน



[ภาพที่ 6](#)

แสดงภาพของหน้ากากอนามัยที่ใช้เส้นใยโพลีพรพิลีน (A) และหน้ากากอนามัยที่ใช้ฉนวนโพลีพรพิลีน (b) [45]

ควรกล่าวว่าปูของโพลีพรพิลีนที่อ่อนนุ่มและเบาถูกใช้ในการผลิตหน้ากากโพลีพรพิลีนและใช้ทำส่วนขอบของหน้ากากอนามัยมาตรฐานและหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 เพื่อป้องกันการรั่วซึม ดังนั้นการใช้โพลีพรพิลีนปิดผนึกบริเวณขอบของหน้ากากจึงช่วยลดการรั่วซึมเล็ดรอดของแบคทีเรียในหน้ากากมาตรฐานได้อย่างเพียงพอและดีกว่าการใช้เทปกาวยึดปิดที่ขอบหน้ากากในการลดแรงต้านระหว่างการหายใจ มีการอ้างว่าหน้ากากโพลีพรพิลีนที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษที่มีกาวสังเคราะห์บริเวณขอบหน้ากากอาจจะน่าประทับใจกว่าหน้ากากอนามัยมาตรฐานและหน้ากากกรองอากาศชนิด N95

แมตเชินและคณะ [49] ได้ใช้วิธีการทดสอบหน้ากากอนามัยชนิดที่ใช้แล้วทิ้ง เพื่อจำลองสภาพจริง ๆ ของสัปดาห์ในห้องพักเพื่อประเมินประสิทธิภาพของหน้ากากทั่ว ๆ ไป 4 ชนิดได้แก่ หน้ากากเส้นใยโพลีพรพิลีน หน้ากากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมเรยอง หน้ากากเส้นใยแก้ว และ หน้ากากเส้นใยเซลลูโลส

ผลจากการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างประสิทธิภาพของหน้ากากเส้นใยโพลีพรพิลีนกับหน้ากากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมเรยอง ถึงแม้ว่าหน้ากากทั้งสองชนิดนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าหน้ากากเส้นใยแก้วอย่างเห็นได้ชัด มีการรายงานว่าประสิทธิภาพของหน้ากากทั้ง 4 ชนิดนี้ได้รับการจัดเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ หน้ากากเส้นใยโพลีพรพิลีน หน้ากากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมเรยอง หน้ากากเส้นใยแก้ว และกระดาษ

คอนดาและคณะ [42] ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพในการกรองของวัสดุต่างชนิดกัน ซึ่งบางชนิดมีส่วนประกอบของโพลีเอสเตอร์ เช่น ผ้าชีฟอง (90% โพลีเอสเตอร์ และ 10% สแปนเด็กซ์) ผ้าสักหลาด (65% ฝ้าย และ 35% โพลีเอสเตอร์) ผ้าไหมสังเคราะห์ (100% โพลีเอสเตอร์) ผ้าซาติน

(97% โพลีเอสเตอร์ และ 3% สเปนเด็กซ์) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าผ้าชีฟองมีประสิทธิภาพในการป้องกันสูงกว่า 50% สำหรับอนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 6.0 ไมครอน และโดยทั่วไปผ้าชีฟองและผ้าสักหลาดมีประสิทธิภาพการกรองที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดทั้งในระดับนาโนเมตร (<300 นาโนเมตร) และระดับไมครอน (300 นาโนเมตร – 6 ไมครอน) ควรสังเกตว่าผ้าซาตินและไหมสังเคราะห์ได้รับการพิจารณาว่าไม่มีประสิทธิภาพในการกรอง (<30%)

3.1. บทบาทของเส้นใยนาโนในหน้ากาก (Role of nanofibers in mask)

สกาเรียและคณะ [50] ได้อธิบายว่าการรวมเส้นใยนาโนเข้าด้วยกันในหน้ากากทำให้แรงต้านอากาศลดลง ด้วยเหตุนี้ปริมาตรของอากาศที่มากขึ้นในการหายใจออกจะ **ถูกส่งผ่านในหน้าจากหน้ากาก** แทนที่จะเสี่ยงไม่ผ่านตัวกรองและกระจายไปรอบ ๆ การสร้างภาพแบบชเลียร์ (Schlieren optical imaging) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของการไหลของอากาศผ่านหน้ากากเส้นใยนาโนโดยการเปรียบเทียบการหักเหภายในและรอบ ๆ หน้ากากมาตรฐานทั่วไป

หยางและคณะ [51] เปรียบเทียบการใช้เส้นใยนาโนกับเส้นใยโพลีเอทิลีนชนิดที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก (nanoporous polyethylene fiber) หรือนาโนฟิเบอร์ ซึ่งเส้นใยนาโนที่มีการยึดเกาะที่แข็งแรง กับฝุ่นพีเอ็มจะช่วยให้มีประสิทธิภาพสูงในการดักจับฝุ่นพีเอ็ม (99.6% สำหรับฝุ่นพีเอ็ม 2.5) ควรตั้งข้อสังเกตว่าแรงต้านอากาศที่ลดลงและชั้นผิว (substrate) ของนาโนฟิเบอร์ที่มีค่าความโปร่งใสแสงอินฟราเรดสูง (92.1% จากการวัดโดยอิงการแผ่รังสีความร้อนจากร่างกายมนุษย์) ทำให้เกิดการกระจายความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (active radiative cooling)

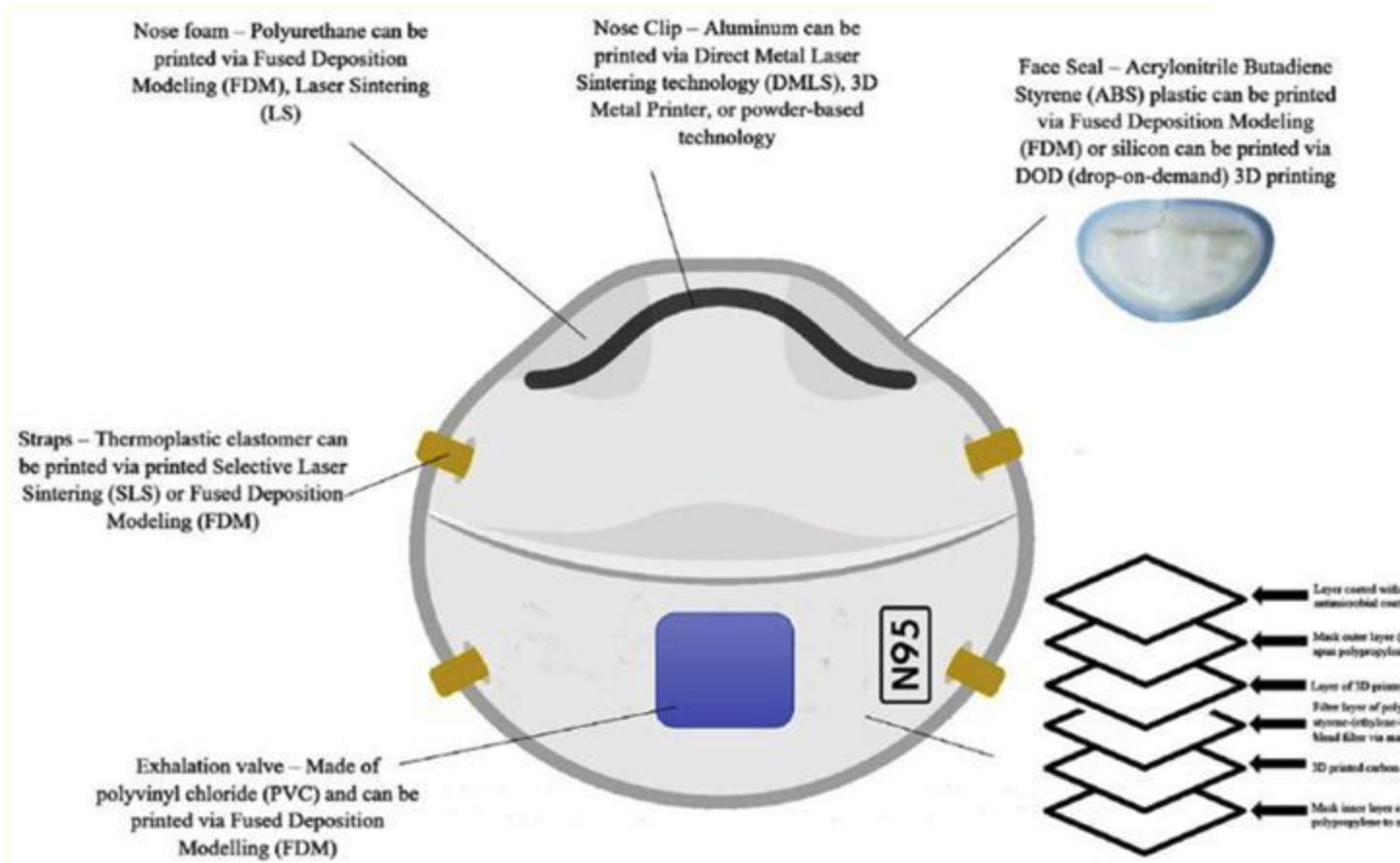
มีการระบุถึงข้อดีของการเคลือบชั้นสารของอนุภาคนาโนเงินลงบนฟ้านาโนฟิเบอร์ของหน้ากากจะทำให้สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้สูง (87.0%) และสามารถใช้เพื่อรักษาความอบอุ่นของร่างกาย

คารากานีและคณะ [52] ได้ออกแบบและรวมเส้นใยนาโนของโพลีอะคริโลไนไตรล์และอนุภาคนาโนเงินเข้าด้วยกัน (polyacrylonitrile/silver - PAN/AgNPs nanofibers) โดยใช้วิธีนี้ในสถานการณ์จริง (in-situ method) จุดมุ่งหมายคือต้องการให้ได้เมมเบรนที่มีอนุภาคนาโนเงินของอนุภาคนาโนเงินที่กระจายตัวสูงที่สามารถฆ่าล้างทำความสะอาดได้ สำหรับผลิตหน้ากากด้านแบคทีเรียที่มีการจัดลำดับชั้น (hierarchically organized antibacterial mask) เพื่อป้องกันแบคทีเรียทั้งจากบุคคลไปสู่สิ่งแวดล้อมและจากสิ่งแวดล้อมไปสู่คน เพื่อเป้าหมายนี้ เส้นใยนาโนที่ได้รับการใช้สนามไฟฟ้าดึงหรือยึดสารละลายที่มีส่วนผสมของโพลีเมอร์ถูกทำให้เสถียรโดยวิธีการให้ความร้อน มีการรายงานที่เส้นใยนาโนของโพลีอะคริโลไนไตรล์ที่ผสมอนุภาคนาโนเงินรอบเดียว (2247 พีพีเอ็ม/กรัมของเส้นใยนาโน) ทำให้ได้เมมเบรนที่มีคุณภาพดีเยี่ยมมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรียเมื่อเปรียบเทียบกับที่ผสม 2 หรือ 3 รอบ มีการระบุว่าการผสมอนุภาคนาโนเงินเพียงรอบเดียวก็เพียงพอในการได้หน้ากากด้านแบคทีเรียที่สามารถฆ่าล้างได้ หวางและคณะ [53] ได้พัฒนาตัวกรองที่ระบายอากาศได้ดีและสวมใส่สบาย ซึ่งประกอบด้วยเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากซึ่งทำมาจากอีเลคโตรโพลีเอเทอร์ซัลโฟน/แบเรียมไททาเนต (electret polyethersulfone/barium titanate nanofibrous membrane - PES/BaTiO₃ NFM) บนชั้นผิวของโพลีโพรพิลีนที่ยังไม่ได้ผ่านการทอ ควรมีการกล่าวถึงเมมเบรนที่ได้มีความพรุนสูงและพลังงานไฟฟ้าที่ประจุมีความเหมาะสม นอกจากนี้เมมเบรนชนิดนี้ยังมีการระบายอากาศที่ดีและให้การแทรกซึมผ่านของไอน้ำได้พอสมควร ทั้งยังมีประสิทธิภาพในการกรองสูง (99.99%) และมีแรงดันลดลงหลังจากผ่านการให้ความร้อนที่ 200 °C เป็นเวลา 45 นาที

การนำตัวกรองที่ทำจากผ้าเมลต์โบลน (melt-blown (MB) filter) ของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และไส้กรองเส้นใยนาโนกลับมาใช้ซ้ำ โดยการพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการกรอง อัตราการไหลของอากาศ พื้นที่ผิว และคุณสมบัติในการรักษารูปทรงได้รับการประเมินหลังจากการทำความสะอาดสองวิธี [54] มีการรายงานว่าประสิทธิภาพของตัวกรองที่ทำจากผ้าเมลต์โบลนลดลงอย่างมาก หลังจากผ่านการทำทำความสะอาดด้วยเอทานอล ในขณะที่ไส้กรองเส้นใยนาโนยังคงมีประสิทธิภาพในการกรองที่สูงเสมอต้นเสมอปลาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการนำไส้กรองเส้นใยนาโนของหน้ากากกลับมาใช้ซ้ำหลังผ่านการซักทำความสะอาดน่าจะเพียงพอในการแก้ปัญหาการขาดแคลนหน้ากาก ในขณะนี้ และยังเป็นการปรับปรุงให้เกิดความปลอดภัยแก่เจ้าหน้าที่ด่านหน้าในการต่อสู้กับโคโรนาไวรัส

3.2. นวัตกรรมในการผลิตหน้ากาก (Innovative technology for fabrication of mask: Additive manufacturing)

มีการใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมจากโพลีโพรพิลีนโดยทั่ว ๆ ไป หลายอย่างเนื่องมาจากราคาต้นทุนที่ต่ำ สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการ สามารถพิมพ์ได้ สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ รวมทั้งความเที่ยงตรงของกลไกการทำงาน [55] ในทางกลับกันสไตรีน-(เอทิลีน-บิวทิลีน)-สไตรีน (styrene-(ethylene-butylene)-styrene (หรือ SEBS) ก็เป็นอีลาสโตเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิห้องและมีการยืดหยุ่นต่ำในระหว่างการอัดรีด ดังนั้นการผสมผสานระหว่างโพลีโพรพิลีนและ SEBS จึงสามารถทำให้เกิดความก้าวหน้าในการขึ้นรูป 3 มิติของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมสัดส่วนของอีลาสโตเมอร์ชนิดที่เป็นเทอร์โมพลาสติก ทำให้เกิดความยืดหยุ่นของวัสดุตามแบบ 3 มิติที่เข้ากันได้แบบสนิทในการผลิตหน้ากาก ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนการพิมพ์แบบ 3 มิติจึงสามารถสร้างสรรค์หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่มีความเสถียรและเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible) ซึ่งสามารถเทียบกันได้กับหน้ากากที่ผลิตในเชิงอุตสาหกรรมยี่ห้อต่าง ๆ [56] **ภาพที่ 7** แสดงต้นแบบของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่พิมพ์ 3 มิติ [56] ตามภาพนี้ หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ส่วนจมูก (nose foam) คลิปยึดส่วนจมูก (nose clip) ส่วนที่ติดกับใบหน้า (face seal) สายรัด (straps) และวาล์วช่วยในการหายใจ (exhalation valve)



[Open in a separate window](#)

ภาพที่ 7

ต้นแบบของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่พิมพ์ 3 มิติ [56].

สเวนเน่นและคณะ [57] ได้แสดงให้เห็นถึงการประดิษฐ์หน้ากากชนิดที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยใช้การพิมพ์ 3 มิติ ที่อิงตามวัสดุและวิธีการ (การสร้างภาพ 3 มิติ และการพิมพ์ 3 มิติ) หน้ากาก 3 มิตินี้ประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่ทำมาจากคอมโพสิตชนิดโพลีเอไมด์ที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ที่พิมพ์ 3 มิติจำนวน 2 ชิ้นส่วน (ตัวหน้ากากและตัวรองรับเมมเบรนตัวกรองอากาศ) และ 2 ชิ้นส่วนที่ใช้แล้วทิ้ง (สายรัดศีรษะและเมมเบรนตัวกรองอากาศ) การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของหน้ากากเหล่านี้สามารถทำได้อย่างรวดเร็วโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ควรสังเกตว่าการทดสอบการรั่วซึมและการทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันเชื้อไวรัสยังไม่ได้มีการทดสอบ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากก่อนการนำไปใช้งานในสถานการณ์จริง

โคและคณะ [58] ได้เสนอเทคโนโลยีใหม่ในการปรับปรุงให้มีความรู้สึกสบายมากขึ้นในการสวมหน้ากากกรองอากาศและผู้สวมสวมได้พอดีโดยการสแกนใบหน้าของอาสาสมัคร 3 คน โดยใช้วิธีสแกนเลเซอร์ 3 มิติ มีการใช้พลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) plastic) โดยอาศัยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ ในการประดิษฐ์หน้ากากต้นแบบ สมควรกล่าวในที่นี้ด้วยว่าระบบตรวจจับแรง (force sensing system) ซึ่งอิงตาม Arduino Uno R3 มีความก้าวหน้าและเซ็นเซอร์ตรวจจับแรงสามารถวัดแรงดันของการกระทบสัมผัสระหว่างหน้ากากกรองอากาศและ

โครงการเสร็จได้ ผลจากการทดลองระบุว่าหน้ากากกรองอากาศที่ได้รับการออกแบบใหม่นี้มีแรงดันที่ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสม

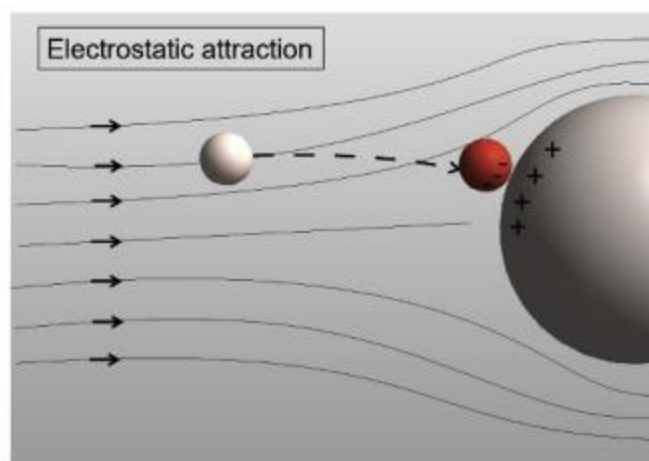
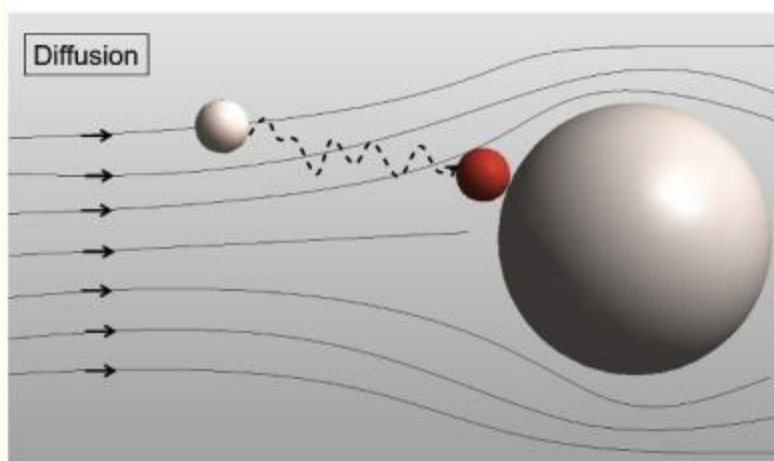
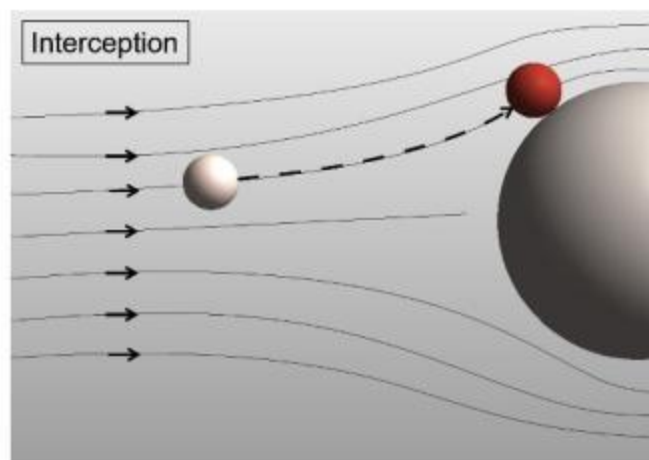
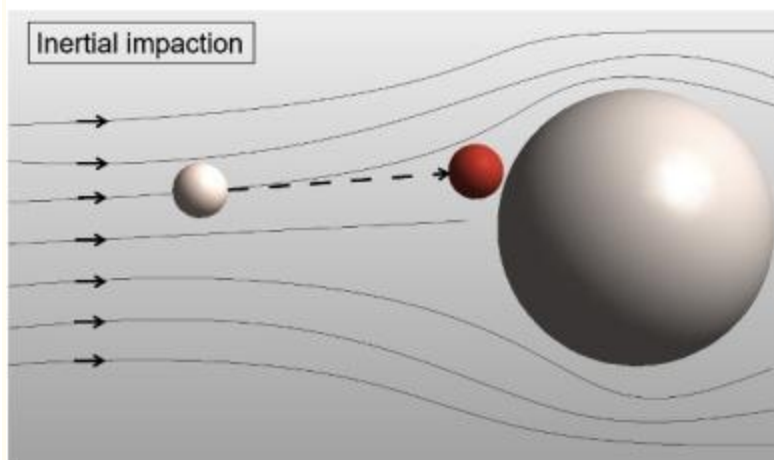
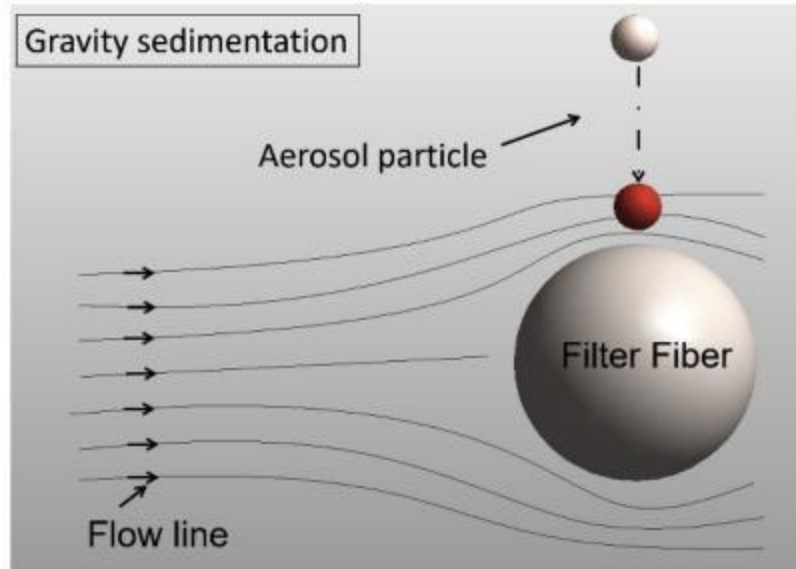
โพรวินชาโนและคณะ [59] ได้เสนอรูปแบบใหม่โดยอิงหน้ากากกรองอากาศที่ได้รับการพัฒนาให้มีเส้นพลาสติกที่ใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติหรือ PLA (printer filament) หมวกที่สามารถถอดออกได้ ชุดตัวกรองที่สามารถถอดออกได้ซึ่งประกอบไปด้วย MERV 16 สองชั้นประกบ MERV 13 ซึ่งอยู่ตรงกลาง และสายรัดที่สามารถถอดออกได้ หน้ากากตามที่ต้องการชนิดนี้ได้ผ่านขั้นตอนการทดสอบเพื่อตรวจสอบการรั่วซึมและสามารถผ่านการทดสอบความพอดี (Bitrix N95 fit test) ที่โรงพยาบาลแห่งมหาวิทยาลัยจอร์จวอชิงตัน (GWU) มีการกล่าวว่าควรพิจารณาใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษในการสวมหน้ากากให้พอดีไม่ให้เกิดการรั่วซึมของอากาศ

หลิวและคณะ [60] แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมต่อประสานกับตัวกรองในเครื่องดมยาสลบโดยใช้หน้ากากกรองอากาศที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้นี้สามารถเป็นทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สำหรับหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่ใช้แล้วทิ้ง นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้ศึกษาประเมินประสิทธิภาพของหน้ากากกรองอากาศที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นโดยการจับบันทึกการทดสอบความพอดี (fit test) เชิงปริมาณ อัตราการหายใจ และค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในลมหายใจขณะที่หายใจออกจนสุดในอาสาสมัคร 8 คน ผลจากการทดลองพบว่าอาสาสมัคร 4 คนจากทั้งหมด 8 คนมีอาการรู้สึกไม่สบาย อาสาสมัคร 2 คนรายงานว่ามีความกดดันบริเวณใบหน้า อาสาสมัคร 1 คนรายงานว่ามีความต้านขณะที่หายใจออก และมี 1 คนที่รายงานอาการมีน้ำมูกเวียนศีรษะชั่วคราวระหว่างที่ออกแรง

4. กลไกการกรอง (Mechanisms of filtration)

การแทรกซึมทะลุผ่านขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค สำหรับอนุภาคที่มีขนาดในระดับที่เล็กมาก ๆ เช่นนี้ การดักจับละอองลอยจะเกิดขึ้นโดยกลไกต่าง ๆ เช่น การตกตะกอนจากแรงโน้มถ่วงของโลก การชนหรือตกกระทบด้วยแรง การสกัตกกัน การแพร่กระจาย และการดึงดูดจากไฟฟ้าสถิต [42,61] ความเป็นไปได้ในการกระตุ้นกลไกเหล่านี้ได้รับการตรวจสอบโดยพิจารณาถึงขนาดของอนุภาค

ภาพที่ 8 แสดงรูปแบบของกลไกต่าง ๆ ที่อนุภาคในอากาศอาจจะแทรกซึมทะลุผ่านหน้ากาก



ภาพที่ 8

แสดงรูปแบบของกลไกต่าง ๆ ของละอองลอยในการแทรกซึมทะลุผ่านหน้ากาก

จลนศาสตร์และกลไกที่เกี่ยวข้องขึ้นอยู่กับประเภทของสารซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมี เช่น น้ำหนักโมเลกุล ขนาดของอนุภาค เป็นต้น

4.1. การตกตะกอนจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity sedimentation)

มีการชี้ให้เห็นว่าสำหรับละอองลอยที่มีขนาดระหว่าง 1 -10 ไมครอน การตกตะกอนจากแรงโน้มถ่วงของโลกจะมีบทบาทสำคัญ เพราะว่าพลังงานที่เกิดจากการทิ้งตัวลงหรือจากแรงโน้มถ่วงของโลก จะมีผลต่อละอองฝอยขนาดใหญ่จากการหายใจออก [42] แม็คคัลลัฟและคณะ [11] ได้กล่าวว่า สำหรับอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า 0.5 ไมครอน แรงเฉื่อยและแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นกลไกที่มีความโดดเด่นมากที่สุด มีการคาดการณ์ว่าละอองลอยที่มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งได้แก่ อนุภาคน้ำยางกลม ๆ ของโพลีส์ไตรีน (0.5 ไมครอน) มีความสามารถในการแทรกซึมทะลุผ่านมากที่สุด

4.2. การชนหรือตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial impaction)

การชนหรือตกกระทบด้วยแรงเฉื่อยเกิดขึ้นเมื่อแรงเฉื่อยของอนุภาคมีมากจนกระทั่งทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นในระหว่างการไหลของอากาศ [62] อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มีความเร็วมากกว่า และความหนาแน่นมากกว่าจะทำให้เกิดแรงเฉื่อยที่มากกว่า และกระบวนการนี้ ทำให้อนุภาคเหล่านี้ถูกดักจับได้ง่าย แรงเฉื่อยของอนุภาคเหล่านี้ทำให้มันไม่สามารถไหลไปรอบ ๆ เส้นใยของหน้ากากกรองอากาศ นอกจากนี้แล้ว แทนที่จะไหลทะลุผ่านตัวกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้จะกระจัดกระจายตามกระแสลม หรือชนเข้ากับเส้นใยตัวกรองและติดอยู่กับเส้นใยตัวกรอง [30] โดยรวมแล้วอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 1 ไมครอนหรือโตกว่านี้อาจจะถูกหยุดยั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกลไกนี้ [63] อย่างไรก็ตามกลไกนี้ไม่สามารถใช้ในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากอย่างอนุภาคนาโนได้ [62,64,65] ประสิทธิภาพของกลไกนี้ในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ (ultrafine particles and Nanoparticles) สามารถถูกมองข้ามไปได้เลย [6]

ควรสังเกตว่าผลกระทบของการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ต่อนอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีความสำคัญ การแพร่กระจาย (diffusion) เป็นกลไกที่ใช้กันทั่วไปให้เกิดการรวมตัวกันก่อนสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมครอน ส่วนกลไกการชนหรือตกกระทบด้วยแรงเฉื่อยจะใช้กับอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า 0.2 ไมครอน [62,64,65]

4.3. การสกัดกั้น (Interception)

การสกัดกั้นเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศเพื่อให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวอนุภาคกับตัวกรองที่รูพรุนของในตัวกรองมีขนาดความกว้างมากกว่าหรือใกล้เคียงกับขนาดของอนุภาค [62] วิธีการนี้ ประสิทธิภาพสำเร็จในการสกัดกั้นอนุภาคที่มีขนาดโตถึง 0.6 ไมครอน [63] การสกัดกั้นไม่ได้ถูกกำหนดโดยความเร็วของอนุภาคแต่จะเห็นได้ชัดมากขึ้นกับอนุภาคมีขนาดเล็ก มีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างการสกัดกั้นและการชนหรือตกกระทบด้วยแรงเฉื่อยคือในการสกัดกั้นตัวอนุภาคจะไม่มีการแผ่บานออกไปจากตรงกลางซึ่งเป็นจุดที่วัสดุในตัวกรองสกัดกั้นอนุภาค [6] มีการรายงานว่าในกรณีที่มีขนาดของละอองลอยอยู่ระหว่าง 100 นาโนเมตร ถึง 1 ไมครอน การแพร่กระจายโดยการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) และกลไกการสกัดกั้นอนุภาคโดยเส้นใยในตัวกรองเป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า [42]

4.4. การแพร่กระจาย (Diffusion)

เมื่ออิงตามหลักการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ของอนุภาคที่กระเด็นกระดอนเข้าตัวกรอง การแพร่กระจายจะเป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมครอน [63] จริง ๆ แล้วการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ผิดไปจากปกติเป็นการเพิ่มความเป็นไปได้ในการเกิดการชนปะทะกันระหว่างอนุภาคด้วยกันและชนกับเส้นใยในตัวกรอง [62] จึงเกิดการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดเล็กอย่างมาก (ultrafine particles and nanoparticles) ซึ่งสำคัญมากกว่าการสกักกัน และในขณะที่อนุภาคมีขนาดเล็กลงหรือมีความเร็วลดลงอัตราการแพร่กระจายก็จะยิ่งมีมากขึ้น เมื่อความเร็วลดลงช่วงระยะเวลาพักตัว (residence period) ของอนุภาคก็จะยิ่งมากขึ้นเพราะมีตัวกรอง ด้วยเหตุนี้ความเป็นไปได้ในการชนปะทะกันระหว่างอนุภาคและตัวกรองก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นอย่างมากมายมหาศาล [31] มีการศึกษาวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการไหลจำนวนมากเคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างขนาดเล็กมาก ๆ ในหน้ากากจะมีการลดความเร็วลงอย่างกะทันหันเนื่องมาจากการแพร่กระจายภายในหน้ากาก [66]

สำหรับกลไกของการขนส่งมวลมีรูปแบบจำลองทั่ว ๆ ไปของกฎข้อที่ 1 ของฟิค (the Fick's first law) ซึ่งสอดคล้องกับการแพร่กระจายมวลในบริเวณพื้นที่หนึ่งในช่วงเวลาหนึ่งและกฎข้อที่ 2 ของฟิค (the Fick's second law) ซึ่งระบุการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น (concentration) ตามเวลาภายในบริเวณนั้น [62,63]

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

สมการที่ 2

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

สมการที่ 3

โดยที่ “J” เป็นการไหลของการแพร่กระจาย (diffusion flux) “D” เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในมิติ (diffusion coefficient in dimensions) “C” เป็นความหนาแน่นในมิติ (concentration in dimensions) “x” เป็นจุดตำแหน่ง (position) และ “t” เป็นเวลา (time)

4.5. แรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิตและการสะท้อนความร้อน (Electrostatic attraction and thermal rebound)

การใช้แรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีการที่สามารถดักจับได้ทั้งอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็กจากกระแสะอากาศ ในวิธีการนี้จะใช้เส้นใยหรือเม็ดเล็ก ๆ ในตัวกรองที่มีประจุไฟฟ้าในการดูดซับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามจากกระแสะอากาศ [30] ในกรณีของอนุภาคขนาดเล็กมากระดับนาโน (nanometer scale) อนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ เหล่านี้จะสามารถหลุดเล็ดรอดระหว่างรูพรุนของเส้นใยตัวกรอง การใช้แรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิตเหมาะกับการดักจับอนุภาคที่มีมวลน้อย ๆ และตัวกรองที่มีประจุไฟฟ้าสถิตมีประโยชน์ที่ความเร็วต่ำ ๆ อย่างเช่นความเร็วในการหายใจผ่านหน้ากาก [42]

กลไกการใช้แรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิตจะมีประสิทธิภาพลดน้อยลงเมื่อความเร็วมากขึ้น นอกเหนือจากกลไกต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว [66] (การแพร่กระจาย การสกักกัน และการการชนหรือตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย) ก็มีตัวกรองที่มีประจุไฟฟ้าซึ่งเรียกกันว่าตัวกรองอิเล็กเตรท (electrets filters) [63,64,67] ส่วน

ใหญ่ของตัวกรองที่ได้รับอนุญาตจากสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (NIOSH) เช่น หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และชนิด P100 ได้รับการระบุว่าเป็นตัวกรองอิเล็กเตรท [6]

มีการศึกษาวิจัยหลายชิ้นที่รายงานว่าประสิทธิภาพของตัวกรองชนิดกลไก (mechanical) และตัวกรองอิเล็กเตรท (electrets filters) มีความแตกต่างกันในการดักจับละอองลอยที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร อนุภาคที่มีขนาด 300 นาโนเมตรได้รับการอธิบายว่ามีความสามารถในการแทรกซึมทะลุผ่านมากที่สุดสำหรับตัวกรองชนิดกลไก (mechanical) ซึ่งไม่มีประจุไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่านี้ก็ทำให้ประสิทธิภาพของตัวกรองอิเล็กเตรท (electrets filters) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าลดลงได้เช่นกัน [10,68] นอกจากนี้การศึกษานี้ยังเปรียบเทียบให้เห็นถึงความสามารถในการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าและที่ไม่มีประจุไฟฟ้า ความสามารถในการแทรกซึมทะลุผ่านสูงสุดเกิดขึ้นกับอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าที่มีขนาด 30 – 40 นาโนเมตร ซึ่งสูงกว่าในกรณีของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้ามาก [17], [18], [19], [20], [21], [22] ถึงแม้ว่ากล่าวกันว่าประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันตามขนาดและชนิดของอนุภาคและตามอัตราการไหลที่แตกต่างกัน [7] อัตราการไหลที่ลดลงจะเพิ่มขนาดของอนุภาคใหญ่สุดที่แทรกซึมทะลุผ่านได้ (most penetrating particle size - MPPS) [22], [23], [24]

5. อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแทรกซึมทะลุผ่าน (Influence of different parameters on the penetration)

ประสิทธิภาพในการกรองของหน้ากากถูกกำหนดโดยขีดความสามารถในการหยุดยั้งอนุภาคและไวรัสในอากาศซึ่งระบุเป็นอัตราส่วนประสิทธิภาพ (efficiency ratio) ขนาดของอนุภาคที่หยุดยั้งได้ ปริมาณอากาศที่ผ่านการกรอง ตลอดจนระยะเวลาในการทำงาน [47] จากมุมมองด้านกลศาสตร์ของไหลมีปัจจัยหลายประการที่มีบทบาทสำคัญในเรื่องนี้ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ ขนาดของละอองลอย ช่องว่างระหว่างโครงใบหน้ากับหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 หรือหน้ากากอนามัย แรงต้านของการไหลของอากาศผ่านช่องว่างที่กระทำต่อการไหลของอากาศที่มีต่อเนื่องผ่านหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 หรือหน้ากากอนามัย [61] ต่อไปนี้เราจะพูดถึงผลของพารามิเตอร์หรือปัจจัยจากภายนอกที่มีผลต่อกลไกการกรอง ซึ่งคุณสมบัติตามที่ต้องการของตัวกรองและประสิทธิภาพได้รับการตรวจสอบ

5.1. พารามิเตอร์หรือปัจจัยจากภายนอก (External condition parameters)

5.1.1. ขนาดและรูปร่างของอนุภาค (Particle size and shape)

คำว่าอนุภาคนาโน (nanoparticle) ใช้กับสเปกตรัมของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร (อย่างน้อยใน 1 มิติ) มีการศึกษาวิจัยทางด้านพิษวิทยาที่ระบุว่าปรกติสารพิษจะมีความเป็นพิษมากขึ้นเมื่อมีขนาดในระดับนาโนเมตรมากกว่าสารที่มีมวลเดียวกันที่มีขนาดในระดับไมโครเมตร (ไมครอน) [11,69,70] เนื่องจากมีพื้นที่ผิวหน้าของอนุภาค มีปฏิกิริยาของผิวหน้า รวมทั้งความหนาแน่นหรือความเข้มข้นมากกว่า [31]

มีการศึกษาวิจัยบางชิ้นบอกเป็นนัยว่าเนื่องจากผลกระทบของการสะท้อนความร้อนอาจทำให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคนาโนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ มีคำศัพท์อยู่ 2 คำที่อธิบายปรากฏการณ์

ของการสะท้อนความร้อน ได้แก่ค่า ความเร็ววิกฤต (critical velocity) และค่าว่าพลังงานจลน์ (kinetic energy) [71]

มีการรายงานว่าความเร็วความร้อนเฉลี่ย (mean thermal velocity) ที่มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ทำให้อัตราการดักจับเพิ่มมากขึ้นโดยที่ขนาดของอนุภาคลดลงภายใต้ค่าสมบูรณ์ และดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความเป็นไปได้ของการแยกจากกันของอนุภาคจากผิวหน้าของตัวกรอง [62] มีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ จะไม่รวมตัวกันเมื่อได้รับการกระทบเนื่องมาจากความเร็วความร้อนเฉลี่ย (mean thermal velocity) ของอนุภาคเหล่านั้นซึ่งสูงเกินความเร็วในการดักจับ (velocity of capture) [72] ในขณะที่ขนาดของอนุภาคลดลงเนื่องมาจากลักษณะของมัน การยึดเกาะของมันก็ลดลงด้วย

ในทางกลับกันอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงก็จะมีการยึดเกาะกับผิวหน้าของตัวกรองได้น้อยลง ซึ่งจากการสังเกตของบราวน์พบว่าอนุภาคเหล่านี้มีพฤติกรรมเหมือนโมเลกุล เนื่องจากมีขนาดเล็กมาก ๆ ระดับนาโนเมตรซึ่งใกล้เคียงกับกลุ่มก้อนโมเลกุล ดังนั้นเมื่ออนุภาคเหล่านี้กระทบกับผิวหน้าของตัวกรองอนุภาคเหล่านี้จึงไม่ยึดเกาะกับผิวหน้าของตัวกรอง [62]

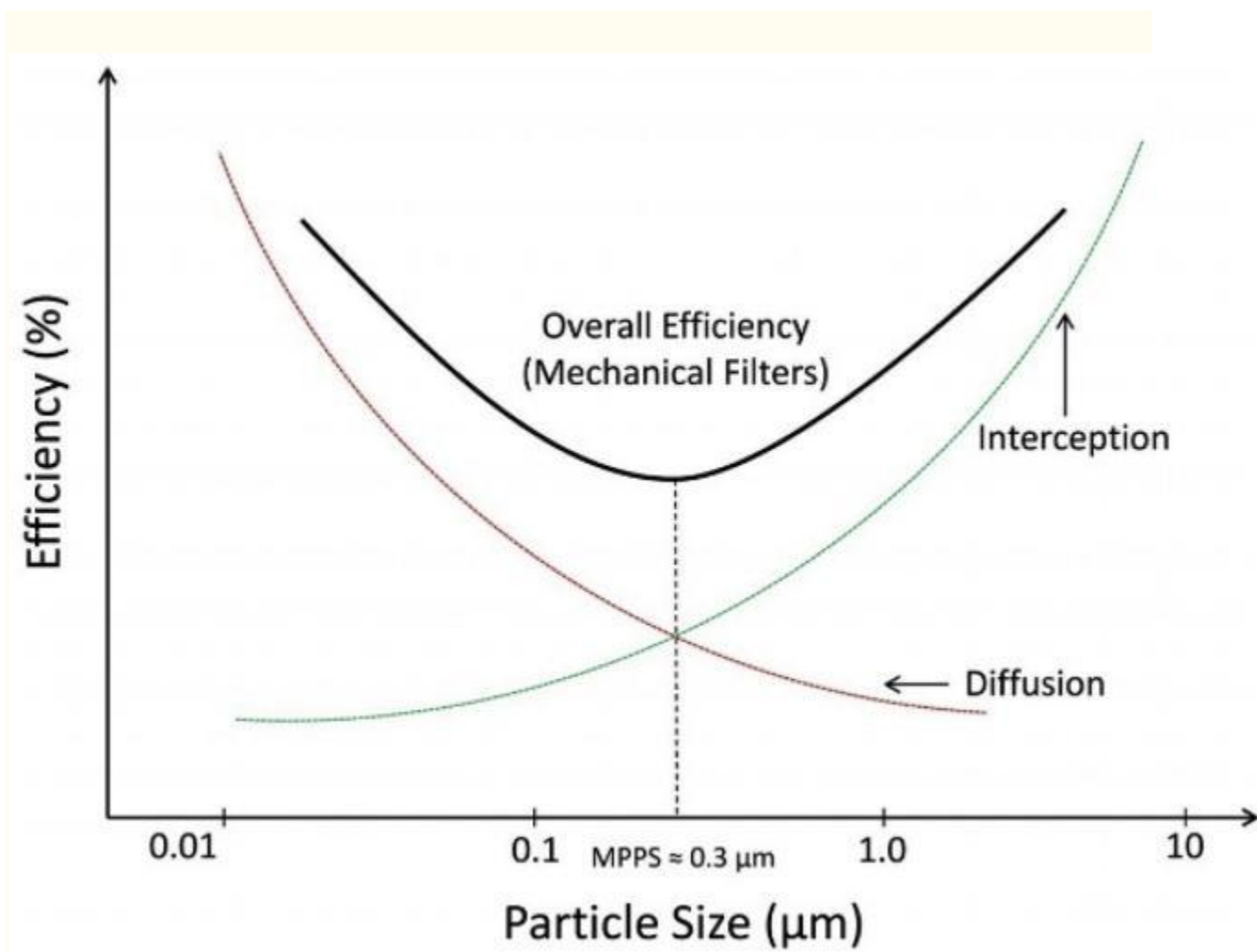
มีการรายงานว่าประสิทธิภาพของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ในการกรองอนุภาคเกลือแกงที่มีขนาดระหว่าง 0.1 – 0.3 ไมครอนและที่มีขนาดโตกว่า 0.74 ไมครอนอยู่ที่ประมาณ 95% และ 99.5% ตามลำดับ [31] ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าประสิทธิภาพของตัวกรองขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ตัวอย่างเช่น สำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วงของแสงอินฟราเรดและมากกว่า 300 นาโนเมตร ค่าประสิทธิภาพจะอยู่ในช่วง 5–80% และ 5–95% ตามลำดับสำหรับชั้นกรองชั้นเดียว

โดยการพิจารณาให้มีชั้นกรองหลายชั้นและผสมเส้นใยจากฝ่ายด้วย ประสิทธิภาพของตัวกรองลูกผสม (hybrids) (เช่น ฝ่ายกับไหม ฝ่ายกับซีฟอง ฝ่ายกับสั๊กหลอด) สูงกว่า 80% (สำหรับอนุภาคขนาดเล็กกว่า 300 นาโนเมตร) และมากกว่า 90% (สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 300 นาโนเมตร) [42] มีการรายงานว่าขนาดของอนุภาคใหญ่สุดที่แทรกซึมทะลุผ่านได้ (MPPS) สำหรับหน้ากากกรองอากาศชนิด P100 และชนิด N95 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 – 0.2 ไมครอน และ 0.05 ไมครอนตามลำดับ [73]

มีนักวิจัยหลายคนที่ตรวจหาผลกระทบของการสะท้อนความร้อนที่มีผลต่อการแทรกซึมทะลุผ่านตัวกรองของอนุภาค หวางและแคสเปอร์ [74,75] ได้แสดงให้เห็นว่า**ความเร็วจากการกระทบความร้อน (thermal impact velocity)** ของอนุภาค (ที่มีขนาดระหว่าง 1 – 10 นาโนเมตร) ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายอย่าง เช่น การยึดเกาะกับผิวหน้าและความยืดหยุ่นจะสูงเกินความเร็ววิกฤตในการยึดเกาะ (critical sticking velocity) แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาวิจัยอีกชิ้นหนึ่ง [76] คณะผู้วิจัยไม่สังเกตพบการสะท้อนความร้อนในกรณีอนุภาคเกลือแกงที่มีขนาดระหว่าง 4 – 30 นาโนเมตร ดังนั้นจึงดูเหมือนว่าผลที่ได้มานี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคที่ใช้ในการทดลองด้วย [6]

มีการแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทางเคมีฟิสิกส์บางอย่าง เช่น โครงสร้างของอนุภาค ศักยภาพในการรวมตัวกันของอนุภาค ตลอดจนการเคลือบผิวหน้าของอนุภาคล้วนมีผลต่อพฤติกรรมของอนุภาคขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร [77] สำหรับอนุภาคขนาดเล็กระดับไมครอนที่ถูกกรองโดยตัวกรองชนิดกลไก (mechanical filters) พบว่ากลไกที่โดดเด่นชัดที่สุดคือการสกัดกั้นและการแพร่กระจาย ในขณะเดียวกันการชนหรือตกกระทบด้วยแรงเฉื่อยแทบไม่มีความสำคัญอะไรเลย เปอร์เซ็นต์ของ

กลไกต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแทรกซึมทะลุผ่านซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคที่แทรกซึมทะลุผ่านได้แสดงไว้ใน [ภาพที่ 9](#) [31]



[ภาพที่ 9](#)

กลไกการสักระกกันและการแพร่กระจายที่มีผลต่อการแทรกซึมทะลุผ่านตามขนาดของอนุภาค [6]

บ่อยครั้งที่รูปร่างของอนุภาคก็มีผลต่อการเข้าสู่หน้ากาก ตัวอย่างเช่น อนุภาครูปแท่งจะมีศักยภาพในการแทรกซึมทะลุผ่านได้น้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของอนุภาคทรงกลม โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนลักษณะหรืออัตราส่วนภาพ (aspect ratio) ซึ่งมีการรายงานว่าอัตราส่วนลักษณะของรูปแท่งต่อทรงกลมอยู่ที่ 4 [78]

5.1.2. ความเร็วหน้าหรือการไหลของอากาศ (Face velocity or airflow)

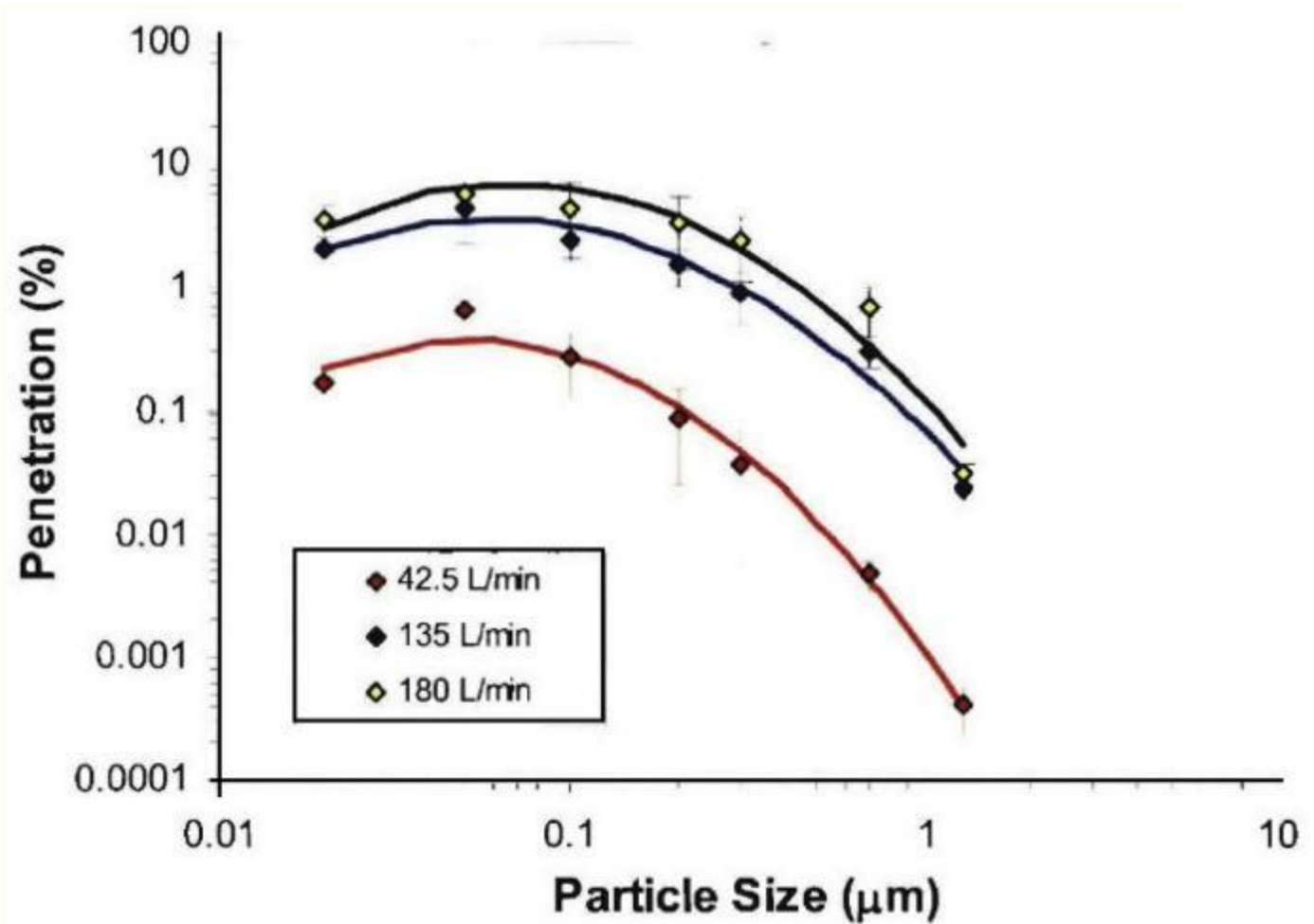
การไหลของอากาศมีความสำคัญอย่างมากในหลาย ๆ ด้าน เพราะใช้อัตราการหายใจของคนเราจะต่างกันไปตามสถานการณ์ ควรกล่าวว่าการแทรกซึมทะลุผ่านจะมีมากขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มมากขึ้น และความแตกต่างของอัตราการไหลของอากาศไม่ได้เป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ เพราะหาปริมาณที่แท้จริงที่ทำให้เกิดการติดเชื้อหรือเสียชีวิต (actual infectious or

lethal dose) ที่เรารับเข้าไปจะเปรียบเทียบได้ว่าเท่ากับอัตราการไหลของลมหายใจทั้งหมด (total breathing flow rate) [61] ปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของตัวกรองที่เป็นเส้นใย ก็คืออัตราการไหลของอากาศ และปัจจัยนี้ก็มีผลต่อกลไกทั้งหลายที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศมีน้อยการแพร่กระจายและแรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิตจะเป็นกลไกที่มีบทบาทมีความสำคัญมากกว่า เนื่องจากช่วงระยะพักตัว (residence time) ของอนุภาคมีมากกว่า แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้นกลไกการสกัดกั้นจะกลับมีความโดดเด่นขึ้นมา [6]

คุนดาและคณะ [42] ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ (3.2 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองลดลง มีการกล่าวกันว่าในระหว่างที่ทำงานหนักอัตราการหายใจเข้าของคนเราสามารถสูงเกิน 350 ลิตร/นาที นอกจากนี้ยังมีการแสดงให้เห็นว่าการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคมีมากขึ้นเนื่องจากช่วงระยะพักตัว (residence time) ที่สั้นลงในตัวกรอง [12]

เครียนและคณะ [31] ได้ตรวจหาประสิทธิภาพในการกรองของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และ หน้ากากชนิดกันฝุ่น/ควัน/หมอก (dust/fume/mist (DFM)) ตลอดจนหน้ากากชนิดฝุ่น/หมอก (dust/mist (DM)) ที่อัตราการไหลของอากาศต่างกันคือ 32 ลิตร/นาที และ 85 ลิตร/นาที โดยทำการทดสอบกับเกลือแกง ผลที่ได้พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศต่ำประสิทธิภาพในการกรองมีมากขึ้น ประการแรกเป็นเพราะว่ามีระยะเวลาที่ยาวนานกว่าในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน โดยเส้นใยในตัวกรองที่มีประจุไฟฟ้า ประการที่สองมีการดักจับอนุภาคมากขึ้นเนื่องจากระยะเวลาในการแพร่กระจายของอนุภาคยาวนานขึ้น [31]

ในการศึกษาวิจัยที่ทำโดยริชาร์ดสันและคณะ [12] คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศที่ไหลไปในทิศทางเดียวต่อเปอร์เซ็นต์การแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคนาโนต่าง ๆ กัน โดยทดลองกับหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่มีดักจับกรองสารเคมี (Cartridge type) [ภาพที่ 10](#) แสดงผลที่ได้จากการทดลองซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้นการแทรกซึมทะลุผ่านก็สูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 10

ผลกระทบของขนาดอนุภาคและอัตราการไหลของอากาศที่ไหลไปในทิศทางเดียวต่อประสิทธิภาพการกรองผ่านหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่มีดักจับกรองสารเคมี (Cartridge type) [12]

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของอากาศมีผลอย่างมากต่อการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคผ่านตัวกรองของหน้ากากกรองอากาศ

5.1.3.รูปแบบของการไหลของอากาศที่สม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ (Steady or unsteady pattern of flow)

มีการศึกษาวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบของการไหลของอากาศที่สม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอในฐานที่ตัวแปรอย่างหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามพบว่ารูปแบบของการไหลของอากาศมีความสำคัญน้อยกว่าอัตราการไหลของอากาศอยู่มาก อย่างเช่นที่สเตาฟฟอร์ดและคณะ [12] ได้ทำการทดสอบการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคน้ำยางของโพลีสไตรีนชนิด mono-disperse (PSL) และอนุภาคไดโอทิลพาทาเลท (DOP) ที่มีการไหลวนเป็นวงกลม 3 อัตรา คือที่ 30 ลิตรต่อนาที ที่ 35 ลิตรต่อนาที และ 53 ลิตรต่อนาที และการไหลไปในทิศทางเดียวที่อัตรา 32 ลิตรต่อนาที แม็คคัลลัฟและคณะ [11] ก็ได้ทำการตรวจหาความจริงในเรื่องนี้โดยใช้การไหลวนเป็นวงกลมที่อัตรา

85.1 ลิตรต่อนาที และการไหลไปในทิศทางเดียวที่อัตรา 32 ลิตรต่อนาที อนุภาคที่เลือกใช้ในการศึกษามีขนาดเล็กลงกว่า 0.47 ไมครอน คณะผู้วิจัยแถลงว่าการไหลวนเป็นวงกลมมีการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลไปในทิศทางเดียว [31] นอกจากนี้ในงานศึกษาวิจัยอีกชิ้นหนึ่งคณะผู้วิจัยได้รายงานว่านอกจากการไหลวนเป็นวงกลมจะมีการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคมากกว่าแล้วก็ยังสามารถใช้ทำนายการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคในการหายใจของมนุษย์ได้เพราะสภาพการณ์จริง ๆ เป็นอย่างเดียวกัน [6,31]

เอชบาฟและคณะ [73] ได้เลือกใช้เงื่อนไขการไหลไปในทิศทางเดียว 3 อัตรา (85 ลิตรต่อนาที 270 ลิตรต่อนาที และ 360 ลิตรต่อนาที) ในการทดสอบระยะเวลา (เป็นนาฬิกา) ค่าเฉลี่ยการหายใจเข้า และอัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้าในเงื่อนไขการไหลแบบวนเป็นวงกลม 4 อัตรา (40 ลิตรต่อนาที 85 ลิตรต่อนาที 115 ลิตรต่อนาที และ 135 ลิตรต่อนาที) ผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดหมายคือเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นทั้งการไหลไปในทิศทางเดียวและการไหลแบบวนเป็นวงกลมการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [73]

5.1.4. สถานะการประจุของอนุภาค (Charge state of particle)

อนุภาคที่มีประจุและอนุภาคที่ไม่มีประจุมีพฤติกรรมไม่เหมือนกันในการแทรกซึมทะลุผ่าน มีการศึกษาวิจัยหลายชิ้นที่พิสูจน์ว่าอนุภาคที่ไม่มีประจุมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมทะลุผ่านต่ำกว่าอนุภาคที่มีประจุอย่างมาก ควรกล่าวว่าขนาดของอนุภาคที่เล็กลงจะลดความแตกต่างในเรื่องนี้โดยการพิจารณาถึงการมีอยู่ของตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลกระทบ ตัวอย่างเช่นสำหรับในกรณีที่มีความเร็วหน้า (face velocity) สูง ๆ ขนาดของอนุภาคจะมีผลน้อยลงเนื่องจากมีช่วงระยะเวลาพักตัว (residence time) สั้นลง [79] ดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ว่ากลไกที่มีความโดดเด่นชัดเจนมากที่สุดสำหรับอนุภาคนาโนคือการแพร่กระจาย ดังนั้นการประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคจึงมีประสิทธิภาพต่อการแพร่กระจายมากกว่า

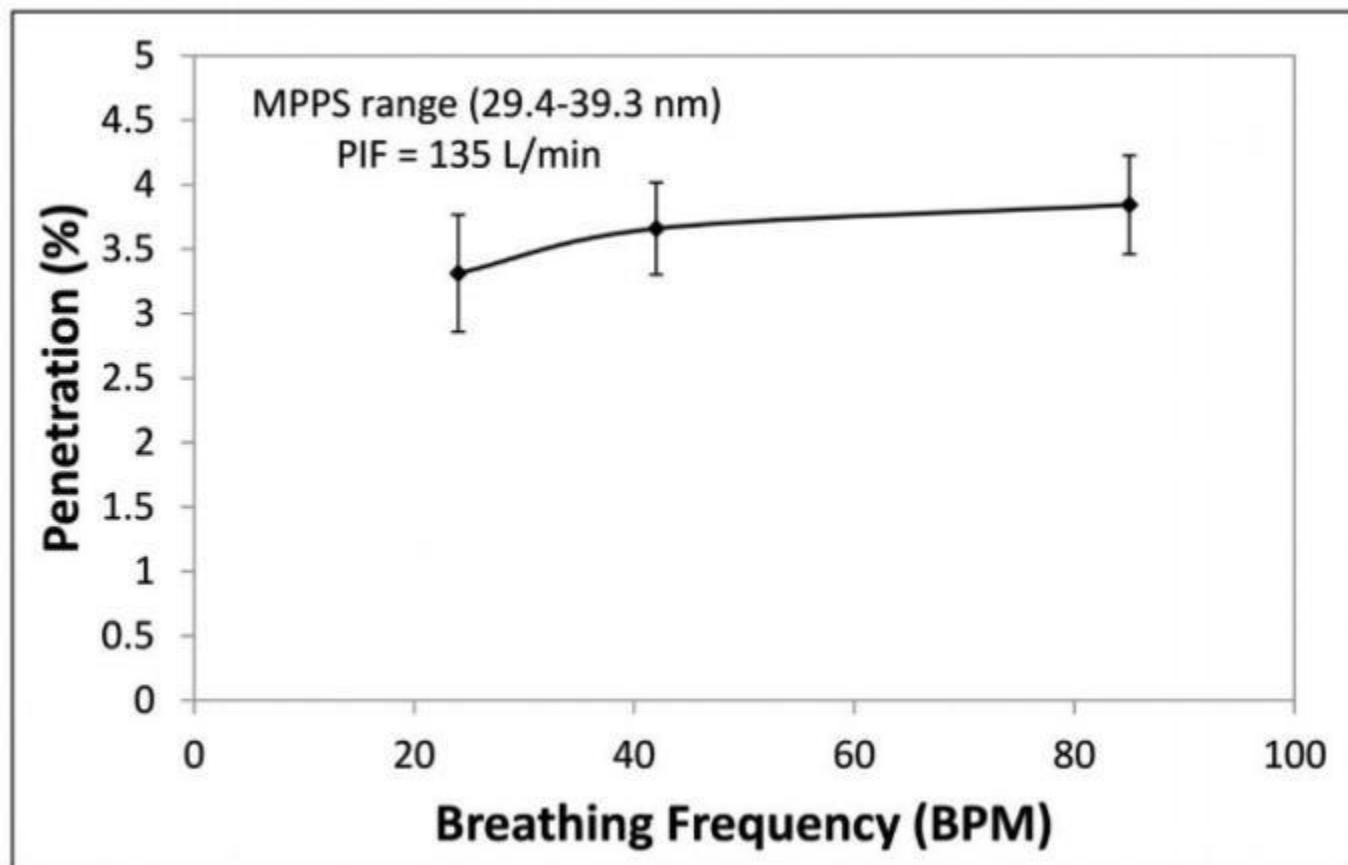
นอกจากนี้แล้วปรากฏการณ์ก็ยังคงมีความแตกต่างกันระหว่างตัวกรองที่มีประจุและตัวกรองที่ไม่มีประจุพบว่าตัวกรองอีเลคโตรเมติกมีประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าสำหรับอนุภาคที่เป็นกลาง อย่างไรก็ตามพบว่ามีมีความแตกต่างที่ชัดเจนในเรื่องการแทรกซึมทะลุผ่านระหว่างอนุภาคที่มีประจุและอนุภาคที่ไม่มีประจุสำหรับตัวกรองแบบกลไก (mechanical filters)

5.1.5. ความถี่ในการหายใจ (Frequency of respiration)

ความถี่ (frequency) และอัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้า (peak inhalation flows (PIF)) เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับประสิทธิภาพการแทรกซึมทะลุผ่าน ถึงแม้ว่ามีการรายงานว่าอัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้ามีความสำคัญมากกว่าความถี่ในการหายใจมากมายนักก็ตาม มีการใช้คลื่นรูปไซน์ (sinusoidal waveform) ในการจำลองอัตราการไหลของลมหายใจและความถี่ในการหายใจ [80]

เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่ออัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้า (PIF) เปลี่ยนไป ความถี่ในการหายใจก็มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ความอ่อนไหว (sensitivity) นี้มีมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้า (PIF) มีค่าสูง ๆ มากกว่าเมื่ออัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้า (PIF) มีค่าต่ำ ๆ [31]

เรื่องนี้มีเหตุผลสนับสนุนจากการศึกษาวิจัยโดยมาห์ดารีและคณะ [6] ตามที่ได้แสดงไว้ใน [ภาพที่ 11](#) การแทรกซึมทะลุผ่านที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากันคือ 135 ลิตรต่อนาทีสำหรับความถี่ในการหายใจที่ต่างกันจะต่ำกว่า 5% อยู่เสมอ นอกจากนี้สามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการหายใจแต่กลไกการกรองก็แทบจะไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสำหรับความแตกต่างกันของอัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้า ผลที่ได้กลับไม่เป็นเช่นนั้น ตัวอย่างเช่น เมื่ออัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้า (PIF) เปลี่ยนจาก 135 ลิตรต่อนาที เป็น 360 ลิตรต่อนาที ที่ความถี่ 42 min^{-1} การแทรกซึมทะลุผ่านจะเพิ่มสูงขึ้น 145% [31]



[ภาพที่ 11](#)

การแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคขนาดใหญ่สุดที่แทรกซึมทะลุผ่าน (MPPS) ที่มีขนาดระหว่าง 29.4 -39.3 นาโนเมตร สำหรับอัตราการไหลวนเป็นวงกลม (135 ลิตรต่อนาที) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของลมสูงสุดในการหายใจเข้าเปรียบเทียบกับความถี่ (อัตราการเดินของหัวใจที่ 24 ครั้งต่อนาที ที่ 42 ครั้งต่อนาที และ 85 ครั้งต่อนาที) โดยทดลองกับหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 [6]

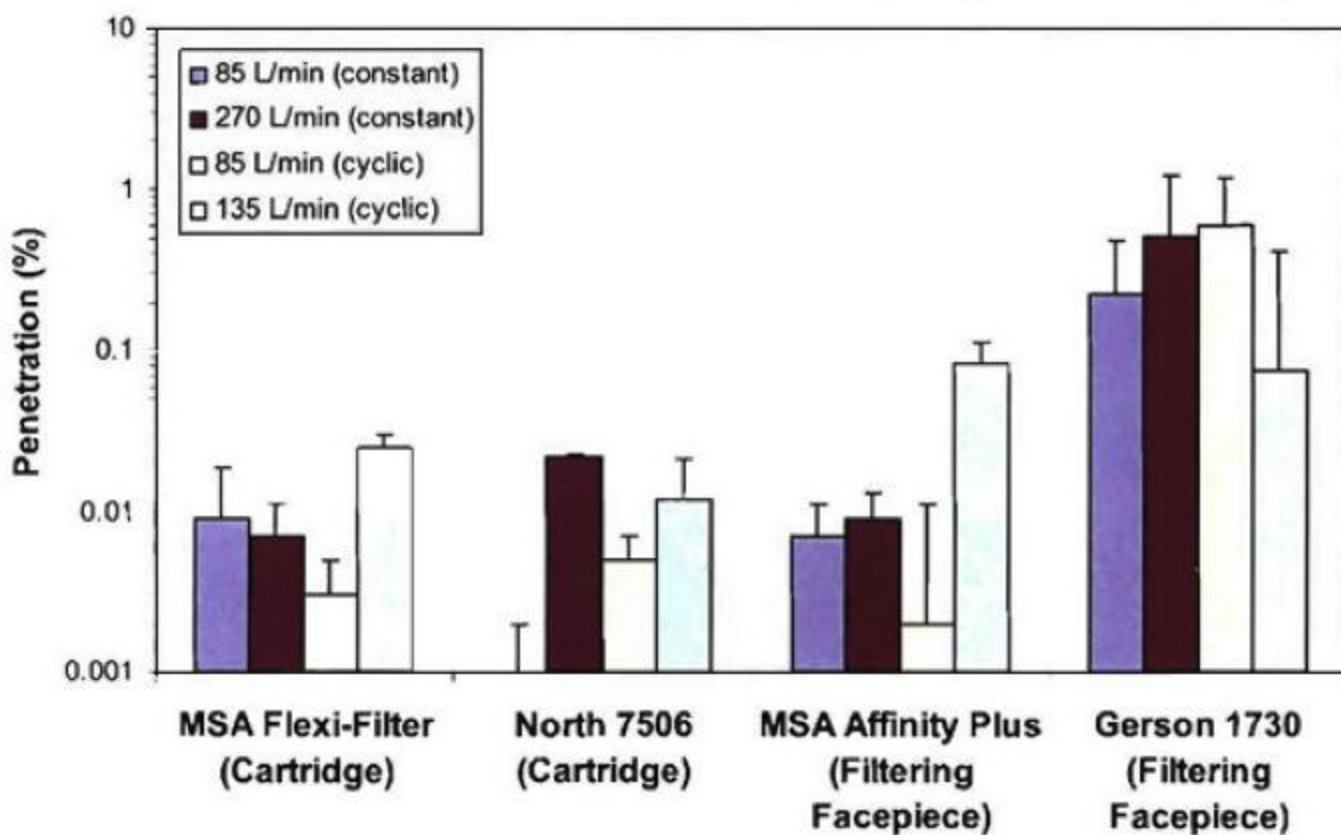
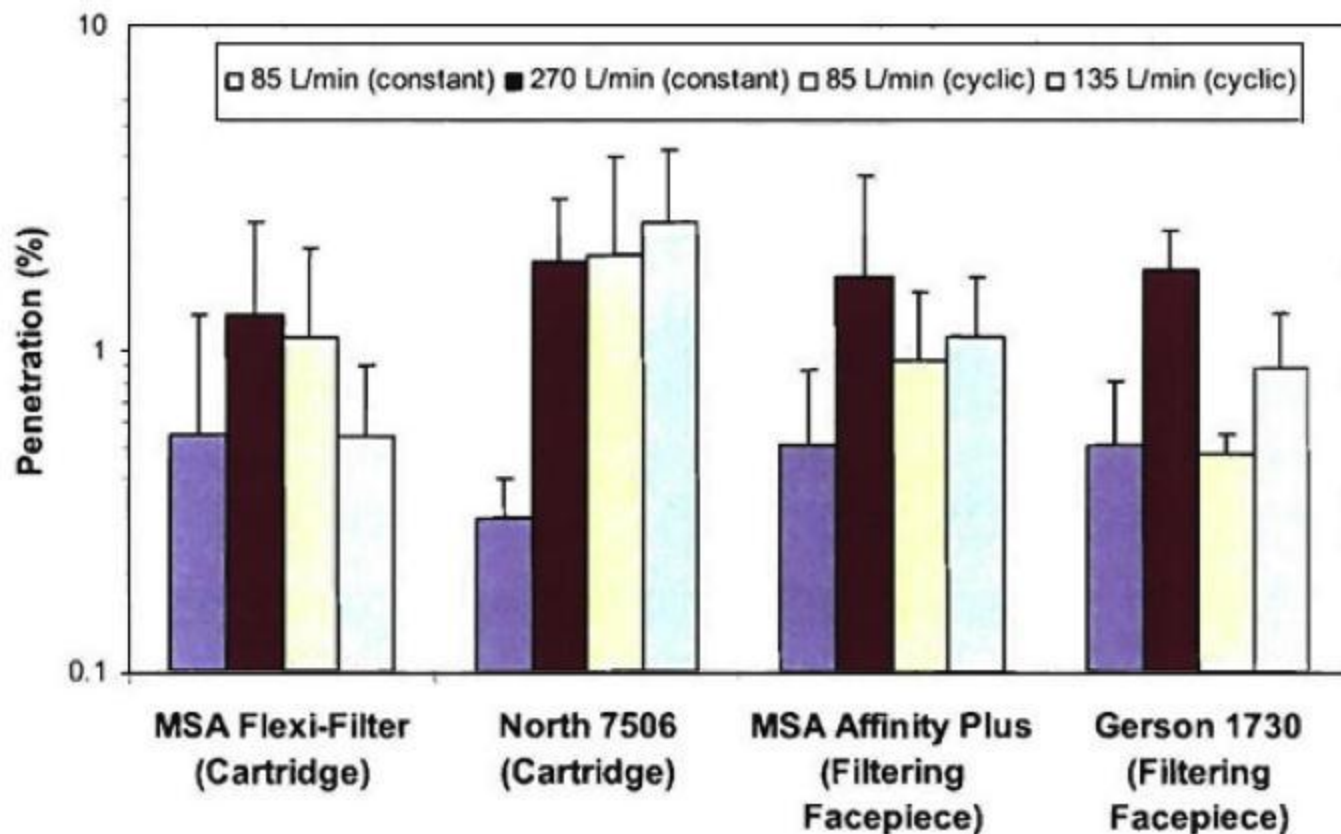
5.1.6. ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ (Relative humidity and temperature)

ปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกรองคือความชื้น แต่เพราะการที่การศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ยังมีอยู่น้อยมาก จึงไม่สามารถให้ความเห็นอย่างแน่นอนชัดเจนลงไปได้ มีการศึกษาวิจัยชิ้นหนึ่ง

ระบุว่าความชื้นไม่มีผลแต่ก็มีการศึกษาวิจัยต่อมาที่แสดงว่าประสิทธิภาพที่น้อยลงของหน้ากากในสภาพที่ขึ้นมาจากแรงดึงดูดตามช่องเล็ก ๆ (capillary force) ระหว่างอนุภาคกับตัวกรอง [81]

นอกจากนี้แล้วสำหรับตัวกรองชนิดกลไก (mechanical filter) ผลการศึกษากับตัวกรองอิเล็กเตรท (electrets filters) ซึ่งเป็นตัวกรองที่มีประจุ (charged filters) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกรองลดลงขณะที่มีความชื้นมากขึ้น เหตุผลก็คือว่าความชื้นที่สูงขึ้นจะนำไปสู่การลดลงของประจุในเส้นใยตัวกรองและในอนุภาคด้วย [82]

ในการศึกษาวิจัยโดยหลี่และคณะ [43] คณะผู้วิจัยอ้างว่าความชื้นและอุณหภูมิสูง ๆ ในลมหายใจออกสามารถทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำภายในหน้ากาก เนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิของหน้ากาก นอกจากนี้ละอองฝอยที่ออกมาระหว่างการพูดคุยก็ยังเพิ่มความเป็นไปได้ในการเกิดความเปียกชื้น [43] [ภาพที่ 12](#) มาจากการศึกษาวิจัยโดยริชาร์ดสันและคณะ [12]



ภาพที่ 12

เปรียบเทียบปริมาณ MS2 ที่วัดได้จากการแทรกซึมทะลุผ่าน (a) “ขณะที่แห้ง” และ (b) “ขณะที่เปียก” โดยใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 กับ การไหลแบบที่ไหลไปในทิศทางเดียวและแบบที่ไหลวนเป็นวงกลมในอัตราต่าง ๆ กัน [6]

ภาพนี้แสดงให้เห็นถึงการแทรกซึมทะลุผ่านตัวกรองของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน (ไหลไปในทิศทางเดียวที่อัตรา 85 ลิตรต่อนาที และ 270 ลิตรต่อนาที และ ไหลวนเป็นวงกลมที่อัตรา 85 ลิตรต่อนาที และ 135 ลิตรต่อนาที) ทั้งในสภาพที่แห้งและเปียก เป็นที่ น่าสังเกตว่าค่าเฉลี่ยของการแทรกซึมทะลุผ่านมีการเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ข้อสรุปสำคัญคือในสภาพที่เปียกขึ้นมีการแทรกซึมทะลุผ่านเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับใน สภาพที่แห้ง

โรเบิร์ตและคณะ [83] ได้ให้ข้อสังเกตว่าการสวมใส่หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 เป็นเวลา

2 ชั่วโมงที่อัตราการทำงานต่ำ ๆ ถึงปานกลาง (low-moderate work rate) ไม่ได้เป็นการเพิ่มความร้อนในปริมาณ มากมายต่ออุณหภูมิร่างกายและอุณหภูมิบริเวณผิวหนังที่เปิดเผย แต่ในทางกลับกันจะทำให้อุณหภูมิบริเวณ ผิวหนังที่มีหน้ากากกรองอากาศปิดอยู่สูงขึ้นอย่างมาก

5.1.7. ช่วงระยะเวลาการรับภาระในการกรองของหน้ากาก (Loading time)

ความสามารถในการแทรกซึมทะลุผ่านมีการผันแปรตามระยะเวลาการรับภาระในการกรองของหน้ากาก อีกด้วย ซึ่งในการศึกษาวิจัยของมาห์ดารีและคณะ [6] คณะผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นว่าการแทรกซึมทะลุ ผ่านของอนุภาคนาโนซึ่งส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตรมีการลดลงเมื่อระยะเวลาการรับภาระ ในการกรองของหน้ากากมากขึ้นทั้งในสภาพการไหลไปในทิศทางเดียวและการไหลวนเป็นวงกลม ตัวแปรนี้มีผลกระทบมากในกลไกการแพร่กระจายด้วยความที่เป็นกลไกที่อาศัยเวลา เมื่อถึงเวลา หนึ่งตัวกรองก็จะมีอนุภาคที่แบกภาระมาในปริมาณมาก ดังนั้นจึงไม่เหลือที่ว่างเพียงพอสำหรับให้ อนุภาคใหม่ ๆ ได้จับกับผิวหน้าตัวกรองอีกต่อไป อย่างไรก็ตามการชนปะทะกันระหว่างอนุภาคด้วย กันและชนกับเส้นใยของตัวกรองจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) [6]

ในกรณีนี้การที่มีระยะเวลาการรับภาระในการกรองของหน้ากากยาวนานจะทำให้การดึงดูดจาก ไฟฟ้าสถิตลดลง สำหรับกลไกอื่น ๆ เช่นการสกัดกั้นจะได้รับผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การแพร่กระจาย [82] ช่วงระยะเวลาการรับภาระในการกรองของหน้ากากยังได้รับผลกระทบจากขนาด ของอนุภาคอีกด้วย เพราะสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ๆ (มากกว่า 100 นาโนเมตร) การแทรกซึม ทะลุผ่านจะมีมากในชั่วโมงที่ 2 และชั่วโมงที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาก่อนหน้านี้ ถึงแม้ว่าจะ ลดลงเล็กน้อยใน 2 ชั่วโมงต่อมา ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการสะสมของอนุภาคในรูปแบบเดนไดรต์ (dendrite form) ซึ่งป้องกันมิให้มีการแทรกซึมทะลุผ่าน [6]

ตารางที่ 2 เป็นการสรุปและเปรียบเทียบปัจจัยภายนอกต่าง ๆ

ตารางที่ 2

อิทธิพลของปัจจัยภายนอกต่อประสิทธิภาพการกรอง

ปัจจัยภายนอก	ประสิทธิภาพการกรองของหน้ากาก	อ้างอิง
ขนาดของอนุภาค	ขนาดของอนุภาคที่ลดลงทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง	[11,31,45,61,68,69,73], [74], [75], [76]
รูปร่างของอนุภาค	อัตราส่วนลักษณะที่มีค่าต่ำ ๆ ทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง (อนุภาครูปแท่งแพร่กระจายได้น้อยกว่าอนุภาครูปทรงกลม)	[78]
ความเร็วหน้าหรืออัตราการไหลของอากาศ	อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง	[12,17,31,42]
รูปแบบการไหลของอากาศ (ไหลไปในทิศทางเดียวหรือไหลวนเป็นวงกลม)	การไหลของอากาศที่ไหลวนเป็นวงกลมทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลไปในทิศทางเดียว	[6,11,12,31]
สถานะการประจุของอนุภาค	ประสิทธิภาพการกรองลดลงสำหรับอนุภาคที่ไม่มีประจุ	[79]
ความถี่ของการหายใจ	ความถี่ของการหายใจที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง	[6,31]

ความชื้นและ อุณหภูมิ	ความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกรองลด ลง	[12,43,81,82]
-------------------------	--	---------------

ช่วงระยะเวลารับ ภาระในการกรอง ของหน้ากาก	ช่วงระยะเวลารับภาระในการก กรองของหน้ากากที่ยาวนาน ทำให้ประสิทธิภาพการกรอง เพิ่มขึ้น (อย่างไรก็ตามก็มีความ เสี่ยงจากการสะสมไวรัส)	[6,82]
--	--	--------

5.2. ลักษณะเฉพาะตัวของตัวกรอง (Filter characteristic)

ตัวกรองที่ใช้ในหน้ากากกรองอากาศและหน้ากากอนามัยควรยอมให้ผู้สวมใส่หน้ากากสามารถหายใจได้ และควรสามารถป้องกันการอุดตันในรูพรุนและยังคงยอมให้อากาศไหลผ่านเข้าไปในตัวกรองได้ การยืดเกาะของอนุภาคกับเส้นใยของตัวกรองที่เพิ่มมากขึ้นอาจจะเป็นปัญหาได้ เพราะว่าเมื่ออนุภาคที่ถูกดักจับที่ตัวกรองมีปริมาณมากพอแล้วก็จะเริ่มมีการอุดตันที่รูพรุนของเครือข่ายเส้นใยของตัวกรอง แรงดึงดูดแบบแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals bonding) และแรงอื่น ๆ จะยืดเกาะกับอนุภาคที่ถูกเส้นใยตัวกรองดูดซับ ทำให้เป็นการยากสำหรับอนุภาคที่ถูกจับจะเล็ดรอดไปได้ [30]

5.2.1. องค์ประกอบทางเคมีของตัวกรอง (Filter chemical composition)

โดยปกติทั่วไปตัวกรองในหน้ากากกรองอากาศและหน้ากากอนามัยทำมาจากวัสดุที่เป็นเส้นใย มีสัมผัสอ่อนนุ่มคล้ายผ้าขนสัตว์ หรือกระดาษที่ทำจากเส้นใยไฟเบอร์กลาส หรือโพลีโพรพิลีน [30] มีการเติมเรซินลงไปบนเส้นใยขนสัตว์ธรรมชาติเพื่อให้เก็บประจุไฟฟ้าสถิตในตัวกรองที่มีประจุไฟฟ้าสถิตยุคแรก ๆ [30] ควรกล่าวว่าเส้นใยโพลีเอสเตอร์สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยจากธรรมชาติหรือฝ้าย เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำน้อยกว่า [42]

5.2.2. ความหนาของตัวกรองและความหนาแน่นของการบรรจุเส้นใยในตัวกรอง (Filter thickness and packing density)

คุนดาและคณะ [42] ได้กล่าวว่าการเพิ่มจำนวนชั้นกรองในหน้ากากจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของหน้ากากให้ดีขึ้น แต่ก็ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุด้วย [42] โชกรีและคณะ [84] ได้ทำการวัดขนาดความหนาของหน้ากากที่ผลิตภายในประเทศ และพบว่าความหนาของหน้ากากที่ผลิตภายในประเทศอยู่ที่ระหว่าง 0.41 – 0.04 นาโนเมตร) ซึ่งหนากว่าหน้ากากที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ความหนาแน่นระหว่าง 0.38 – 0.01 นาโนเมตร) เพราะว่าตัวกรองหลายชนิด ควรกล่าวว่าการลดลงของแรงดันอากาศในหน้ากากอนามัยที่ผลิตภายในประเทศมีสูงกว่าในหน้ากากที่นำเข้าจากต่างประเทศ เพราะว่ามีความหนาแน่นของเส้นใยมากกว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า และมีขนาดความหนาแน่นมากกว่า

ฮวงและคณะ [85] ได้เสนอแบบจำลองเชิงทฤษฎีเพื่อตรวจหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเร็วหน้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย ความหนาแน่นของการบรรจุเส้นใยในตัวกรอง ความหนาของตัวกรอง และความหนาแน่นของประจุในเส้นใยซึ่งมีผลต่อลักษณะเฉพาะตัวของตัวกรองที่ใช้ในการปกป้องระบบทางเดินหายใจ สำหรับตัวกรองอิเล็กเตรท (electrets filters) แล้วสรุปได้ว่าขนาดของอนุภาคใหญ่สุดที่แทรกซึมทะลุผ่านได้ (most penetrating particle size) มีการเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยและความเร็วหน้าเพิ่มขึ้นและความหนาของตัวกรองลดลง นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคใหญ่สุดที่แทรกซึมทะลุผ่านได้ (most penetrating particle size) จะลดลงโดยการเพิ่มความหนาแน่นของการบรรจุเส้นใยในตัวกรอง ความหนาของตัวกรอง หรือความหนาแน่นของประจุในเส้นใย อย่างไรก็ตามสำหรับตัวกรองที่ไม่ใช่ตัวกรองอิเล็กเตรทพบว่าขนาดของอนุภาคใหญ่สุดที่แทรกซึมทะลุผ่านได้ (most penetrating particle size) มีการเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วหน้าลดลง และปัจจัยเรื่องคุณภาพของตัวกรองไม่ได้รับผลกระทบจากความหนาของตัวกรอง นี่จึงแสดงให้เห็นว่าตัวกรองมีประสิทธิภาพในการกรองที่แตกต่างกันตามอัตราความเร็วที่ต่างกัน กล่าวโดยสรุปก็คือว่า **เมื่ออิงตามผลที่ได้จากผลลัพธ์ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยและความหนาแน่นของการบรรจุเส้นใยในตัวกรองที่มีผลต่อปัจจัยคุณภาพ** สรุปได้ว่าไม่มีไส้กรองชนิดครอบจักรวาลหรืออเนกประสงค์ที่ “ดีที่สุด”

5.3. ประสิทธิภาพในการกรอง (Filtration efficiency)

หลี่และคณะ [43] ได้กล่าวว่าจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพสามารถกล่าวได้ว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ยอมให้อากาศและไอน้ำแทรกซึมผ่านได้น้อยกว่าหน้ากากอนามัยอย่างไร้ต้องสงสัย และสามารถป้องกันไวรัสได้ดีกว่าเพียงแต่สวมใส่ไม่สบายเหมือนหน้ากากอนามัย จากการทดสอบการกรองพบว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 สามารถกรองสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ได้ถึง 97% ในขณะที่หน้ากากอนามัยสามารถกรองได้ 95% และในกรณีของหน้ากากนาโน (nano-mask) ก็ไม่พบความแตกต่างในการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ธรรมดาและหน้ากากอนามัยเพียงแต่สามารถระบุได้ว่าหน้ากากนาโนมีความสามารถในการกั้นน้ำและป้องกันเชื้อไวรัสได้ดีกว่า [43]

ดังนั้นหน้ากากอนามัยสำหรับเด็กที่มีชั้นกรองชนิด electrothermal อาจจะมีเหมาะสมกว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่ยังไม่มีการทดสอบหรือหน้ากากอนามัยปรกติ [61]

มีการกล่าวว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 มีประสิทธิภาพในการกรองสูงที่สุด ผลก็คือการแทรกซึมทะลุผ่านต่ำที่สุด นอกจากนี้หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ยังมีขนาดของอนุภาคใหญ่สุดที่แทรกซึมทะลุผ่านได้ (most penetrating particle size) เล็กที่สุด และมีการรายงานว่ามีการลดลงของแรงดันอากาศมากกว่าสองถึงสามเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากอนามัยสำหรับเด็ก จากการพิจารณาผลการศึกษาวิจัยทั้งหมดพบว่าหน้ากากแทบจะทุกยี่ห้อจะระบุค่าสเปคของการกรอง (filtration specification) ขึ้นอยู่กับขนาด **(ของอนุภาค)** [61] สรุปได้ว่าหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และหน้ากากอนามัยมีประสิทธิภาพเท่ากันในการป้องกัน **(อนุภาค)** ในอากาศดังเช่นที่เคยมีการรายงานมาแล้วในบางกรณี [22,61]

เราสามารถสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการกรอง (filtration efficiency (η)) สามารถแสดงในสมการต่อไปนี้:

$$\eta(\%) = 100 - P = (1 - C_{Down}C_{Chal}) \times 100$$

สมการที่ 4

6. การรั่วซึม (Leakage)

เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องรับรู้ว่าการรั่วซึมสามารถทำให้ประสิทธิภาพของหน้ากากลดลงได้ 50% หรือมากกว่านั้น ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการสวมใส่ที่ “พอดี” [42] กุหาและคณะ [61] ได้รายงานว่าไม่มีความสัมพันธ์กันมากนักระหว่างการรั่วซึมกับขนาดของละอองลอยที่มีขนาดเล็กกว่าระดับไมครอน (sub-micron aerosol size) นอกจากนี้จากการพิจารณาขนาดของช่องว่างที่เท่ากันหรือใหญ่กว่าพบว่า การรั่วซึมของละอองลอยผ่านหน้ากากรองอากาศบางที่อาจจะมีมากกว่าในหน้ากากอนามัยและหน้ากากสำหรับเด็ก

ผลกระทบของขนาดละอองลอยต่อการรั่วซึมแสดงให้เห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่สำคัญสำหรับในกรณีละอองลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร แต่สำหรับละอองลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตรพบว่ามีความสัมพันธ์กันเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำ ๆ [61]

มีการรายงานว่าการรั่วซึมของอากาศมีค่าสูง ๆ (3.2 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) และที่อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำ ๆ (1.2 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) ประสิทธิภาพของหน้ากากมีการลดลงอย่างมากเมื่อเกิดรั่ว [43]

เครียนและคณะ [31] ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ละอองลอยของเกลือแกง ผลการวัดขนาดของอนุภาคโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์แสดงว่าหน้ากากรองอากาศชนิด N95 มีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากากชนิดกันฝุ่น/หมอก (dust/mist) และหน้ากากชนิดกันฝุ่น /ควัน/หมอก (dust/fume/mist) และหน้ากากอนามัยที่ไม่ได้รับการรับรอง

ดูเหมือนว่าหน้ากากเกือบทุกชั้นมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรั่วซึม ในการศึกษาวิจัยโดยโชและคณะ [52] คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับการไหลของอากาศที่ไหลวนเป็นวงกลมในอัตราต่าง ๆ กัน โดยใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และพบว่าแม้แต่กับหน้ากากที่สวมพอดี (well-fitted) ก็ยังพบการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคมากที่สุดโดยผ่านการรั่วซึม ในการศึกษาวิจัยโดยฮวงและคณะ [48] คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์การแทรกซึมทะลุผ่านของแบคทีเรียในกรณีที่ไม่ได้สวมหน้ากากเปรียบเทียบกับสวมหน้ากากชนิดต่าง ๆ กัน ได้แก่ หน้ากากอนามัยแบบมาตรฐาน หน้ากากอนามัยชนิดที่มีฉนวนโพลีโพรพิลีน (polypropylene-insulated (PP-I) surgical mask) หน้ากากรองอากาศชนิด N95 และหน้ากากรองอากาศชนิด N95 ที่มีฉนวนโพลีโพรพิลีน (polypropylene-insulated N-95 respirator) เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของหน้ากากชนิดต่าง ๆ กัน ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งทำในอาสาสมัครที่ทดลองถึง 50 ครั้งสำหรับหน้ากากแต่ละชนิด

ตารางที่ 3

เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการรั่วซึมของแบคทีเรียในกรณีไม่สวมหน้ากากและสวมหน้ากากชนิดต่าง ๆ กัน [48]

	ตัวคอนโทรล (ไม่สวม หน้ากาก)	หน้ากาก อนามัยแบบ มาตรฐาน	หน้ากากอนามัย ชนิดที่มีฉนวนโพลีโพรพิลีน	หน้ากาก กรองอากาศ ชนิด N95	หน้ากากกรอง อากาศชนิด N95 ที่ มีฉนวนโพลีโพรพิ ลีน
จำนวนโคโลนีของ แบคทีเรียเฉลี่ยต่อ การทดลองหนึ่งครั้ง	209.6	33.18	9.36	8.54	3.66
จำนวนโคโลนีของ แบคทีเรียทั้งหมด	10480	1659	468	427	183
เปอร์เซ็นต์ของตัว คอนโทรล	100.00	15.83	4.47	4.07	1.75

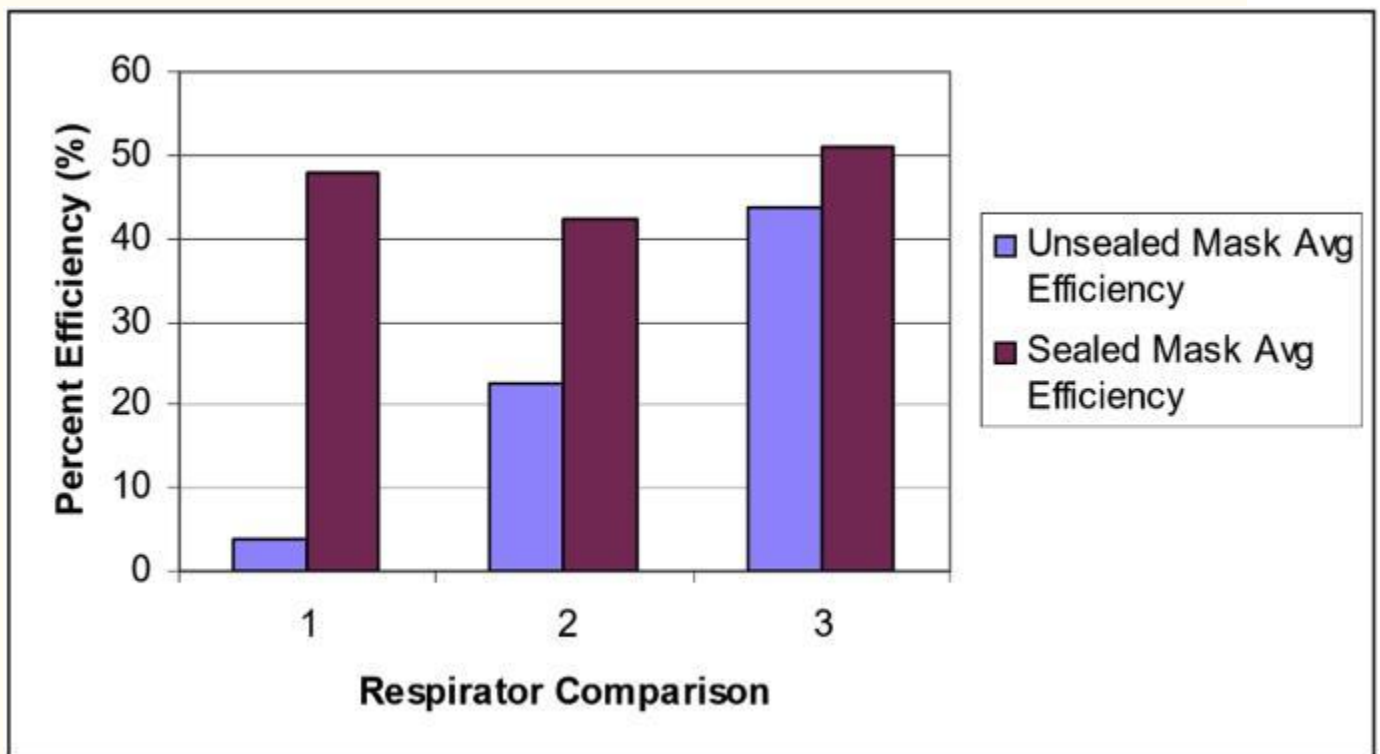
ค่าการแทรกซึมทะลุผ่าน : หน้ากากอนามัยแบบมาตรฐานเปรียบเทียบกับหน้ากากอนามัยชนิดที่มีฉนวนโพลีโพรพิลีนน้อยกว่า 0.01; หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 เปรียบเทียบกับ หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ที่มีฉนวนโพลีโพรพิลีนน้อยกว่า 0.01

นอกจากนี้ในการศึกษาวิจัยอีกชิ้นหนึ่งโดยซานเซซและคณะ [86] คณะผู้วิจัยได้เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพของหน้ากากอนามัยชนิดต่าง ๆ กันจำนวน 6 ชนิดที่สวมใส่ในลักษณะที่ต่างกัน 2 รูปแบบคือแบบ unsealed และแบบ sealed (แสดงใน [ภาพที่ 13](#)) [ภาพที่ 14](#) แสดงให้เห็นถึงผลจากการทดลองสำหรับอนุภาคที่มีขนาด 0.5 ไมครอนในการทดลอง 5 ครั้ง



ภาพที่ 13

(a) แสดงการสวมหน้ากากอนามัยในลักษณะ Unsealed ซึ่งเป็นการใช้งานตามปกติ (b) แสดงการสวมหน้ากากอนามัยในลักษณะ sealed โดยใช้สายรัดหน้ากาก [86]



ภาพที่ 14

ประสิทธิภาพของการสวมหน้ากากอนามัยในลักษณะ Unsealed และลักษณะ sealed กับอนุภาคที่มีขนาด 0.5 ไมครอน [86]

7. การจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (Numerical models)

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics (CFD)) หรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) ในการตรวจหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อกลไกของการแทรกซึมทะลุผ่านและในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการกรอง

ไลและคณะ [87] ได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics (CFD)) ในการจำลองการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนผ่านใบหน้ามนุษย์และคาดล่วงหน้าว่าจะมีการรั่วซึมในบริเวณระหว่างหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 กับโครงสร้างใบหน้าแบบต่าง ๆ กันจำนวน 10 แบบและหน้ากากกรองอากาศจำนวน 6 ชนิด โดยใช้กล้องวงจรปิดอินฟราเรดในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าตัวเลขที่ได้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการสวมหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 อุณหภูมิของผิวหนังในบริเวณใกล้กับริมฝีปากมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนการรั่วซึม (the ratio of ‘filter-to-face seal leakage’ หรือ FTFL) ก็ได้รับผลกระทบจากความเร็วในการหายใจ (breathing velocity) และจากค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านความหนืด (viscous resistance coefficient) ของตัวกรอง ถึงแม้ว่ากระแสการไหลของอากาศอย่างอิสระ (freestream flow) จะไม่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนการรั่วซึม (FTFL ratio) ก็ตาม

สมการที่ใช้คือสมการเกี่ยวกับกฎทรงมวล (mass conservation equation) สมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equations ที่เป็น 3 มิติ และสมการพลังงาน (energy equation) (สำหรับรายละเอียดดูในข้ออ้างอิง [88]) นอกจากนี้การนำความร้อนของหน้ากากแสดงโดยสมการข้างล่างนี้ [87]:

$$\rho_f c_f \partial T_f / \partial t = k_f \nabla^2 T_f + \rho_b w_b c_b (T_b - T_f)$$

สมการที่ 5

โดยที่ ρ , T , t , และ k คือ ความหนาแน่น อุณหภูมิ ระยะเวลา และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามลำดับ วัสดุตัวกรองหมายถึงวัสดุเส้นใยที่มีรูพรุนในการจำลองการต้านทานการไหล การลดลงของแรงดันเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ผ่านวัสดุเส้นใยที่มีรูพรุน และกฎของดาร์ซี (Darcy's law) สามารถอธิบายได้โดยสมการโมเมนต์ข้างล่างนี้ [87]:

$$\nabla p_a = -\mu_a \alpha \nabla V_a$$

สมการที่ 6

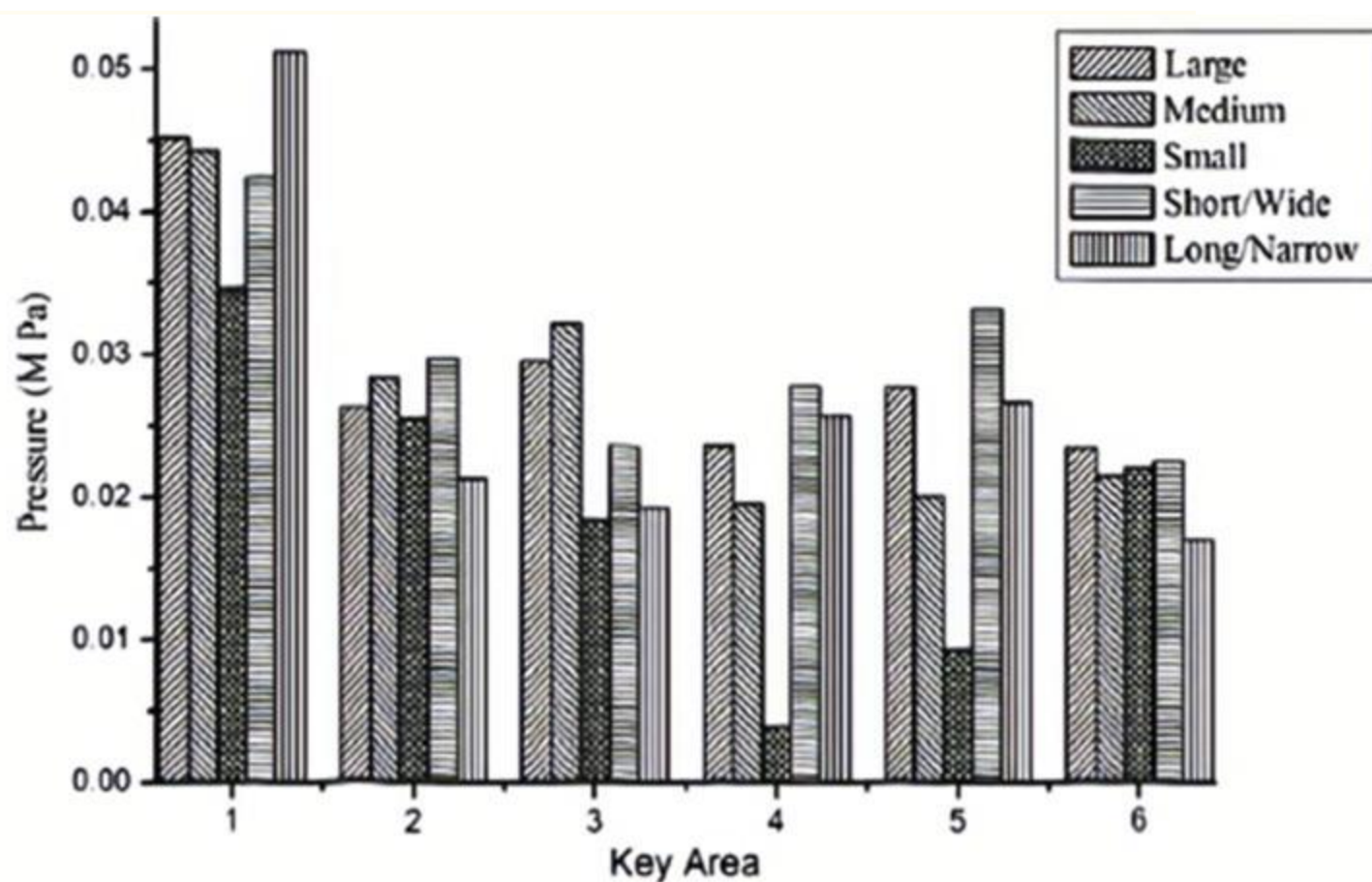
นอกจากนี้ในส่วนของวัสดุตัวกรอง มีการใช้ค่าการนำที่มีประสิทธิภาพ (effective conductivity) ในสมการการนำความร้อนข้างล่างนี้ [87]:

$$\partial \partial t [(1-\epsilon) \rho_f c_f T_a + \epsilon \rho_a c_a T_a] + \rho_a \nabla \cdot (V_a T_a) = \nabla \cdot \{ [(1-\epsilon) k_f + \epsilon k_a] \nabla T_a \}$$

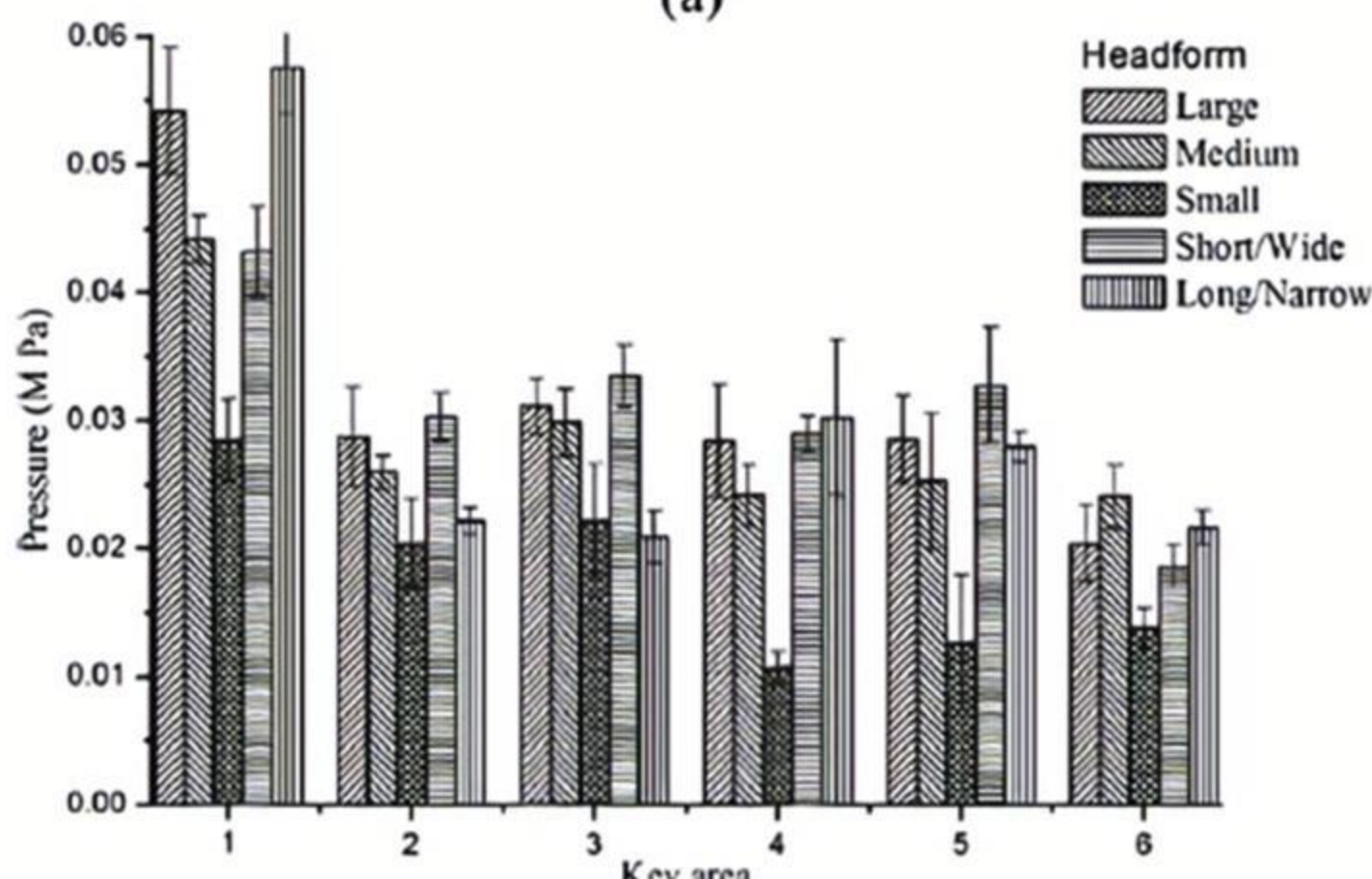
สมการที่ 7

ลีโอนาร์ดและคณะ [66] ได้ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการประเมินผลของการสวมหน้ากากในห้องที่มีการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องที่ความเร็วต่างกัน 2 ค่าความเร็ว นอกจากนี้มีการอภิปรายเกี่ยวกับผลที่ตามมาภายหลังของการรั่วซึม (aftereffect of leakage) รอบ ๆ หน้ากาก และผลกระทบของการสวมหน้ากากต่อความสามารถในการเกิดการหายใจไม่ออกเนื่องจากความเร็วของการไหลของอากาศที่สูง ๆ และทำให้เกิดการไหลทะลักของอากาศ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความเร็วของลมหายใจออกของผู้ป่วยที่อยู่ในระหว่างการบำบัดรักษาโดยให้ออกซิเจนที่มีอัตราการไหลต่ำ ๆ หรือการบำบัดรักษาอาการหายใจไม่ออกเนื่องจากความเร็วของการไหลของอากาศที่สูง ๆ สามารถลดลงได้โดยการสวมหน้ากากอนามัย ผลที่ตามมาคือการสวมหน้ากากอนามัยเป็นวิธีการที่มีประโยชน์ในการลดการสะสมของละอองฝอยเนื่องจากการไหลของลมหายใจออก ชกเว้นในกรณีที่เกิดการรั่วซึมของหน้ากาก [66]

ไอลและคณะ [89] ได้จำลองศึกษาแรงดันสัมผัส (contact pressure) ของหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างแบบจำลองดิจิทัล 3 มิติของหน้ากากชนิดกรองอากาศและโครงสร้างใบหน้าแบบต่าง ๆ กัน ภาพที่ 15 แสดงค่าแรงดันสัมผัสสำหรับโครงสร้างใบหน้าแบบต่าง ๆ จำนวน 5 แบบกับหน้ากากกรองอากาศขนาดเดียวกันในบริเวณจุดสำคัญ ๆ บนใบหน้าจำนวนทั้งสิ้น 6 จุดด้วยกัน



(a)



ภาพที่ 15

ค่าแรงดันสัมผัสสำหรับโครงสร้างใบหน้าแบบต่าง ๆ จำนวน 5 แบบกับหน้ากากกรองอากาศขนาดเดียวกันในบริเวณจุดสำคัญ ๆ บนใบหน้าจำนวนทั้งสิ้น 6 จุดด้วยกัน ได้แก่ a) ผลที่ได้จากการคำนวณ (b) ผลที่ได้จากการทดลอง (1) ตั้งจมูก (2) เหนือแก้มขวา (3) เหนือแก้มซ้าย (4) ใต้แก้มขวา (5) ใต้แก้มซ้าย และ (6) คาง [89]

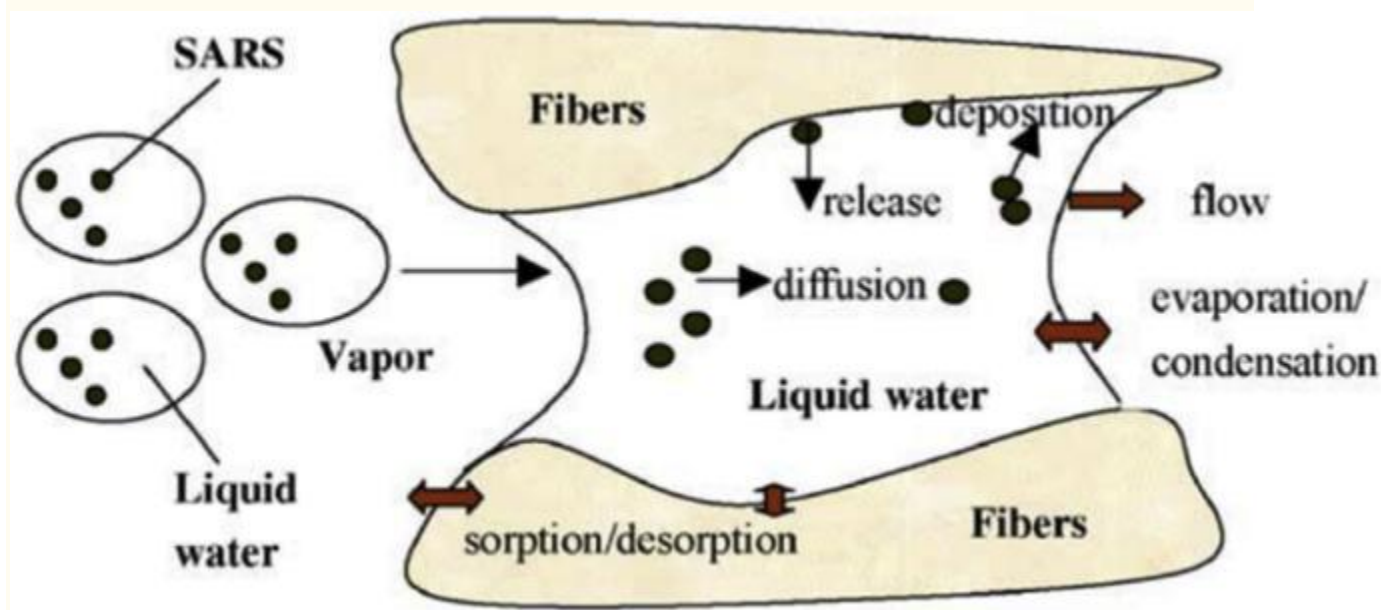
หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 จำนวน 2 แบบได้รับการพิจารณาให้ใช้ในการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวหน้ากากกับโครงสร้างใบหน้าแบบต่าง ๆ กัน แบบแรกเป็นหน้ากากชนิดขนาดเดียวใช้ได้กับโครงสร้างใบหน้าทุกแบบทุกขนาด แบบที่สองมีสองขนาดย่อย (คือขนาดเล็กและขนาดกลาง/ใหญ่) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าหน้ากากแบบที่สองซึ่งมีสองขนาดย่อยมีการกระจายแรงดันสัมผัส (contact pressure distribution) ที่เหมาะสมมากกว่าแบบแรกซึ่งเป็นหน้ากากชนิดขนาดเดียวใช้ได้กับโครงสร้างใบหน้าทุกแบบทุกขนาด (one-size-fits-all masks) มีการรายงานว่าหน้ากากชนิดขนาดเดียวใช้ได้กับโครงสร้างใบหน้าทุกแบบทุกขนาดนี้มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับโครงสร้างใบหน้าขนาดใหญ่ ขนาดปานกลาง และโครงสร้างใบหน้าสั้นแต่กว้างแต่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรั่วซึมในกรณีที่ใช้กับโครงสร้างใบหน้าขนาดเล็กและโครงสร้างใบหน้าที่ยาวแต่แคบ ในทางกลับกันผลของการใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 แบบที่สองซึ่งมีสองขนาดย่อยพบว่าถึงแม้ว่าหน้ากากขนาดกลาง/ใหญ่จะมีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างใบหน้าขนาดใหญ่และโครงสร้างใบหน้าที่ยาวแต่แคบแต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรั่วซึมในกรณีที่ใช้กับโครงสร้างใบหน้าขนาดกลาง นอกจากนี้หน้ากากขนาดเล็กก็สามารถสวมใส่ได้พอดีกับโครงสร้างใบหน้าขนาดกลาง ขนาดเล็กและโครงสร้างใบหน้าสั้นแต่กว้าง

เสี่ยวไต้และคณะ [90] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชั่วคราว (transient numerical simulation) ในการจำลองลักษณะเฉพาะของการไหลของอากาศ ความเร็ว ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระจายความร้อนในการสวมใส่หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ควรกล่าวว่าการตรวจหาค่าแรงดันและความเค้นเฉือนที่ผนัง (wall shear stress) ภายในทางเดินหายใจตอนบนด้วย ซึ่งผลที่ได้บ่งชี้ว่ามีการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหน้ากากเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิ static temperature ในหน้ากากก็เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของลมหายใจออกที่สูงขึ้น และผลที่ได้เหล่านี้สอดคล้องกันกับการทดลอง

มีการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics (CFD)) ในการจำลองอย่างง่าย ๆ 2 มิติ เพื่อจำลองกระบวนการสะสม (loading process) อนุภาคละอองลอยบนเส้นใยตัวกรองเพื่อแสดงผลค่าของการไหลของอากาศรอบ ๆ เส้นใยตัวกรองที่ได้จากการคำนวณจนจบสิ้นกระบวนการจนกระทั่งตัวกรองเกิดการอุดตัน [91] ในแต่ละระดับของการสะสมอนุภาคก็มีการแสดงรูปร่างของตัวกรองที่เปลี่ยนไปต่าง ๆ กัน และข้อมูลเกี่ยวกับการไหลของอากาศรอบ ๆ เส้นใยตัวกรองรวมทั้งประสิทธิภาพของตัวกรองก็ได้รับการคำนวณด้วย **ประสิทธิภาพของเส้นใยแต่ละเส้นในการดักจับอนุภาคได้รับการยืนยันว่าเป็นการประมาณสูงกว่าความเป็นจริงเมื่อไม่ต้องใส่ใจผลกระทบของการสะสมต่อไป** ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อการสะสมอนุภาคเพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพก็สูงขึ้นด้วย ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีการพิจารณาการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์ (physical motion) ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบ (system components) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Navier-Stokes (numerical simulation of Navier-Stokes) รวมทั้งแบบจำลองของ Eulerian (Eulerian simulation) เกี่ยวกับสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและการไหลของอากาศ (particle-flow interaction) **ขนาดของอนุภาคที่**

เลือกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ไมครอนในการยึดเกาะที่แรงเฉื่อยน้อย ๆ สำหรับอนุภาคนขนาดเล็ก และกำจัดการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ตลอดจนการตกค้างสะสมของอนุภาคจากการแพร่กระจาย (diffusional deposition) [92,93] ขนาดของเส้นใยตัวกรองกำหนดไว้ที่ 5 ไมครอนโดยการพิจารณาถึงขนาดของอนุภาคและการลดจำนวนของอนุภาคโดยรวมที่ปล่อยเข้าสู่ระบบ

ยี่และคณะ [13] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาถึงแบบจำลองการถ่ายเทพลังงาน ความร้อนและมวลควบคู่กันไปเพื่ออธิบายกลไกการแพร่กระจายของโมเลกุลไอน้ำ การระเหยกับการควบแน่น การดูดซึมความชื้นกับการคายความชื้นของเส้นใยตัวกรอง การแพร่กระจายแบบบราวน์ (Brownian diffusion) ของเชื้อไวรัส การแทรกซึมทะลุผ่านของไวรัส การแทรกซึมทะลุผ่านตามช่องขนาดเล็ก ๆ (capillary penetration) ของไวรัสพร้อมกับน้ำหรือของเหลว ตลอดจนการเกิดความร้อนแฝง (latent heat) ที่เนื่องมาจากการเปลี่ยนสถานะภายในหน้ากากในระหว่างวงจรหายใจเข้าออก ในส่วนของการทดลองอาสาสมัครได้สวมใส่หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 และเริ่มออกกำลังกายโดยการเดิน กลไกการแพร่กระจายของไวรัสโรคซาร์ ไอน้ำ และน้ำในเส้นใยของตัวกรองแสดงไว้ใน [ภาพที่ 16](#)

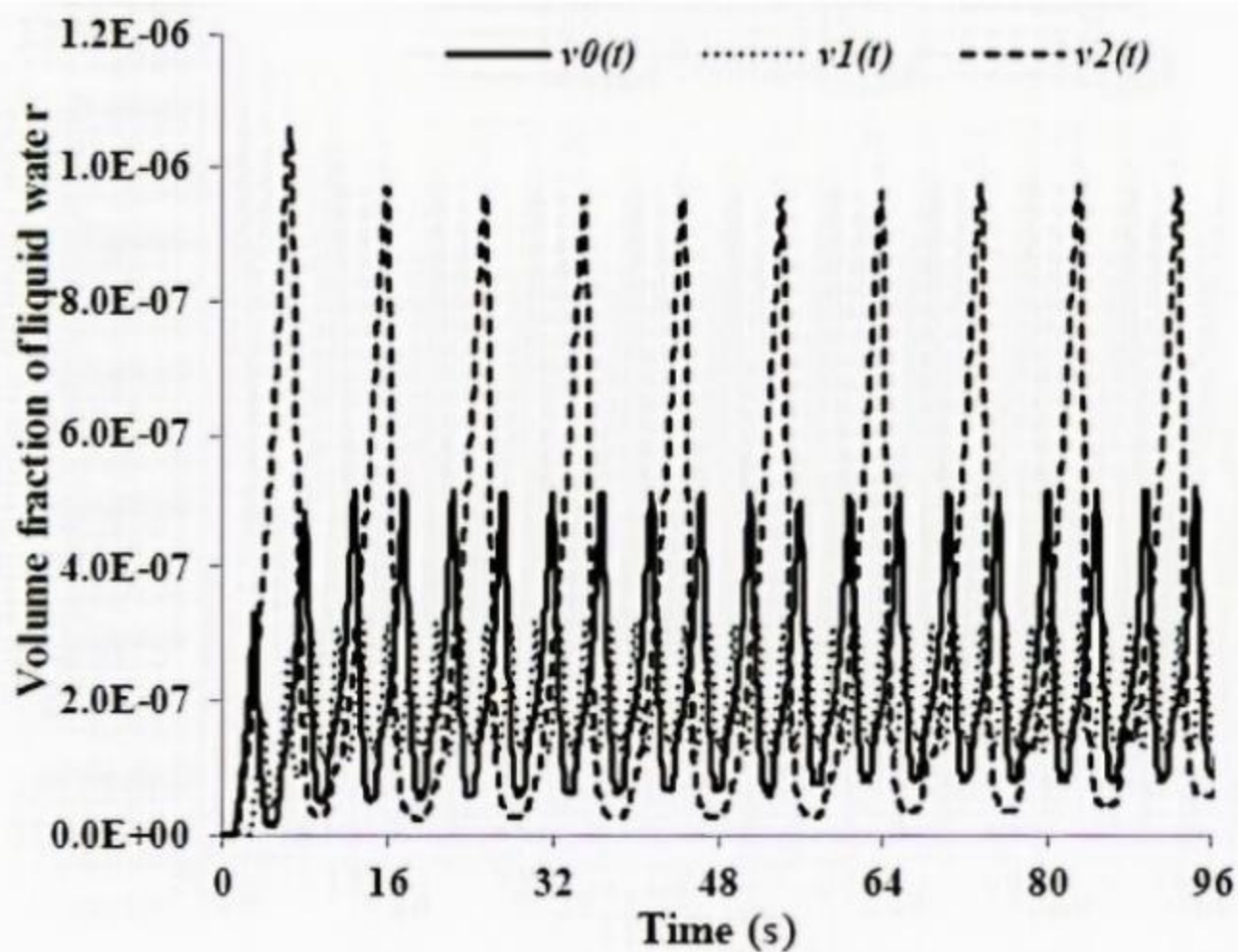


[ภาพที่ 16](#)

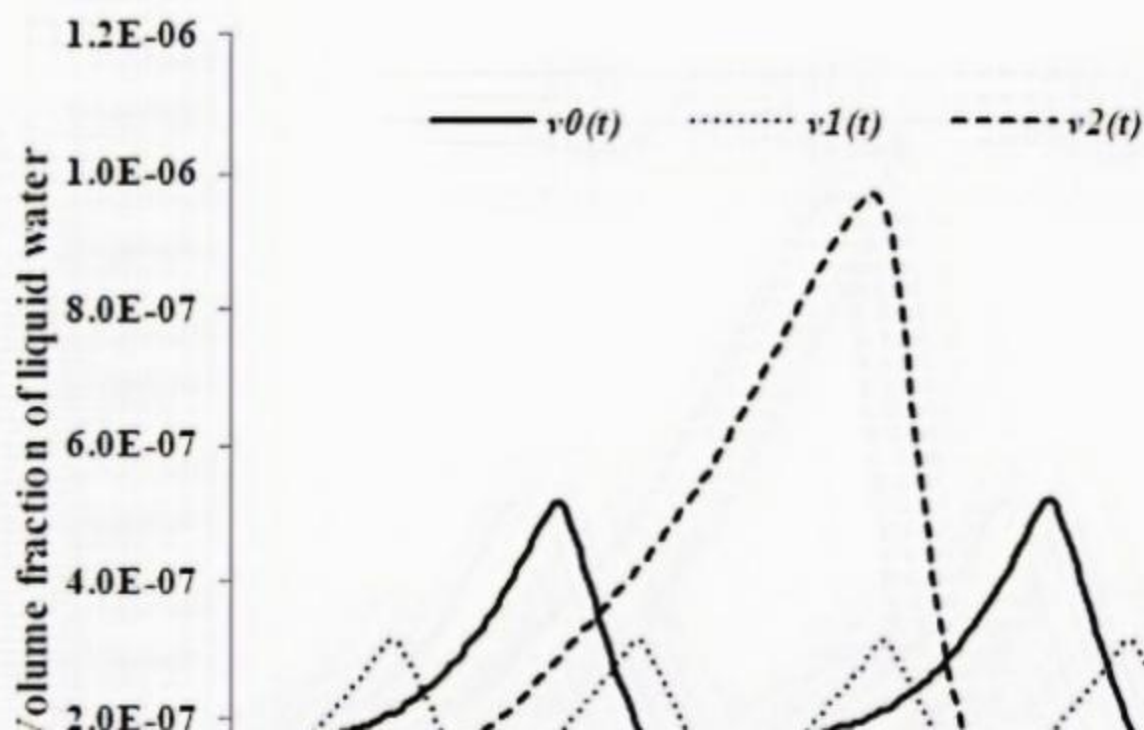
แสดงการถ่ายเทไวรัสซาร์ในหน้ากาก [13]

มีการพ่นสารละลายจำลองเชื้อไวรัสทุก ๆ 10 นาทีที่ระยะห่างจากหน้ากาก 1 เมตรเพื่อตรวจหาความคืบหน้าในการถ่ายเทความหนาแน่น (K^+ concentration) น้ำ ความหนาแน่นของไอน้ำ แรงดัน และอุณหภูมิในระหว่างวงจรหายใจ ผลที่ได้ก็คือ ความหนาแน่นของไอน้ำ แรงดันของอากาศภายในหน้ากาก และอุณหภูมิของหน้ากากมีการเปลี่ยนแปลงตามวงจรหายใจเข้าออก นอกจากนี้แล้วการถ่ายเทไวรัสจากผิวหนังออกไปสู่ผิวหนังในของหน้ากากสามารถจำกัดได้โดยการลดการแทรกซึมผ่านช่องเล็ก ๆ ที่มีประสิทธิภาพ และโดยการเพิ่มความหนาและมุมสัมผัสของตัวกรอง

การควบแน่นของไอน้ำทำให้มีอุณหภูมิและความชื้นที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตและการแพร่ขยายพันธุ์ของเชื้อแบคทีเรียซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย เราและคณะ [94] ได้ใช้วิธีการ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) ในการจำลองการไหลของอากาศในหน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ในการวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิไอน้ำและปริมาณน้ำที่มีเล็กน้อยบริเวณพื้นผิวด้านในของหน้ากากโดยพิจารณาอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอกประกอบด้วย มีการสังเกตพบว่าการลดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอกลงอย่างฉาบฉวยและความเร็วการหายใจในอัตราต่าง ๆ กัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอกมีผลต่ออุณหภูมิภายในหน้ากากเป็นอย่างมากเมื่อการกระจายความร้อนออกไปภายนอกโดยผ่านทางรูพรุนเล็ก ๆ ของตัวกรองหน้ากามีความสำคัญมาก ๆ ควรกล่าวว่าปริมาตรเพียงเล็กน้อยของน้ำที่พื้นผิวด้านในของหน้ากากมีการลดลงจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอกที่สูงขึ้น เพราะว่าการกระจายความร้อนเพิ่มขึ้นระหว่างอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอกกับอุณหภูมิของลมหายใจออก นอกจากนี้การกระจายความร้อนที่เพิ่มขึ้นยังทำให้มีการควบแน่นของไอน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย และปริมาตรเพียงเล็กน้อยของน้ำ (ที่พื้นผิวด้านในของหน้ากาก) จะเพิ่มสูงขึ้นโดยการเพิ่มความถี่ของการหายใจและความเร็วที่ลดลงเนื่องมาจากการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นและการควบแน่นที่มากขึ้นที่อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอกนั้น ๆ (ภาพที่ 17)



(a)

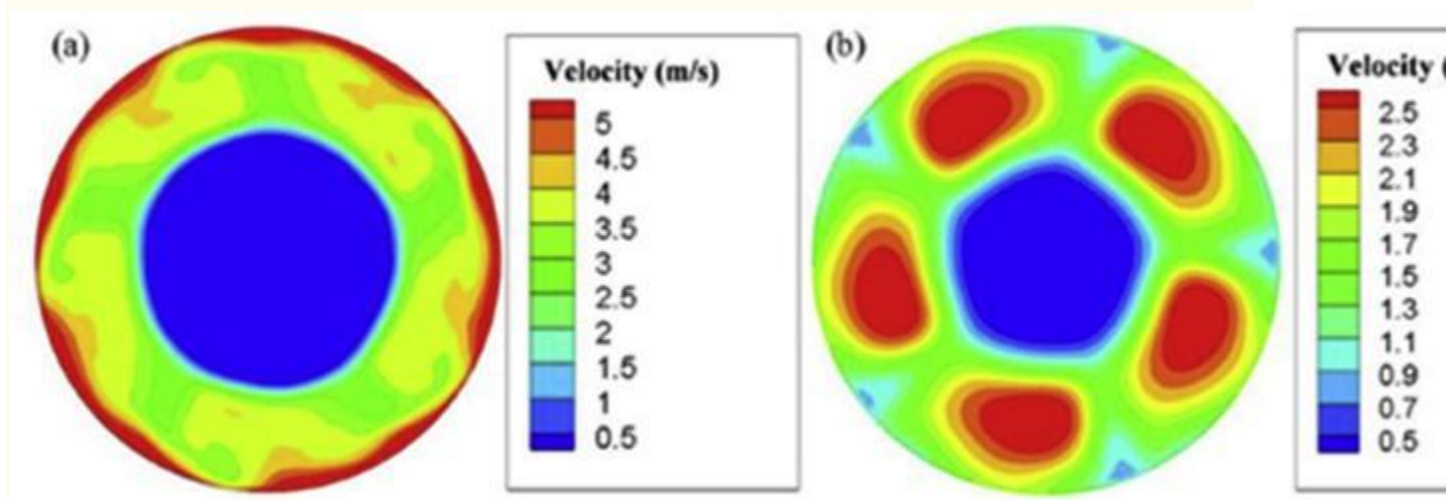


ภาพที่ 17

ความผันแปรของปริมาตรเพียงเล็กน้อยของน้ำในของหน้ากาก (a) ช่วงเวลาการหายใจเต็มที่ (full breathing time) 0-96.0 s, (b) ช่วงเวลาการหายใจ (the breathing time) 86.4-96.0 s [94]

ช่างและคณะ [95] ได้พัฒนาปรับปรุงการออกแบบหน้ากากกรองอากาศเพื่อให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบายขึ้น และลดอุณหภูมิของปริมาตรอากาศ dead space และระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างการหายใจ ในอัตราต่ำ ๆ โดยใช้พัฒนาแบบจำลองอากาศ การสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตที่เป็น 3 มิติของ หน้ากากกรองอากาศทำโดยใช้การจำลองย้อนกลับ (reversing modeling) และใช้พลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics (CFD)) ในการจำลองการไหลของอากาศ มีการใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นผู้ที่สวมหน้ากากจึงสามารถเปิดสวิตช์ได้เมื่อใดก็ตามที่ ต้องการ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าพัฒนาแบบจำลองอากาศสามารถเข้ากันได้กับการไหลของอากาศเมื่อ ติดตั้งให้มีการเป่าลมได้อย่างเหมาะสม ปริมาตรเพียงเล็กน้อยของคาร์บอนไดออกไซด์ถูกควบคุม โดยการปรับให้ปริมาตรอากาศ dead space มีความเหมาะสมมากที่สุด ต้นแบบของการทดลองถูกใช้ในการ ตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง มีการกล่าวว่าอุณหภูมิของปริมาตรอากาศ dead space ของหน้ากากกรองอากาศที่ได้รับการติดตั้งพัฒมลดลง 2 °C เมื่อเปรียบเทียบกับหน้ากาก กรองอากาศที่ไม่ได้รับการติดตั้งพัฒม แต่อย่างไรก็ตามไม่มีการประเมินเกี่ยวกับอัตราการแพร่ กระจายของเชื้อไวรัสจากภายนอกที่เข้าสู่หน้ากากหรือเกี่ยวกับประสิทธิภาพของหน้ากาก

ภาพที่ 18 แสดงให้เห็นถึงความเร็วของอากาศจากพัฒม (เป่าเข้าและเป่าออก)



ภาพที่ 18

เส้นแสดงรูปร่าง (contour) ของความเร็วลมจากพัฒม (a) ด้านออก (b) ด้านรับเข้า [95]

8. สรุปผลการศึกษาวิจัย (Conclusions)

ในงานศึกษาวิจัยนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับข้อด้อยและข้อดีของหน้ากากชนิดต่าง ๆ และมีการสำรวจเก็บข้อมูลอย่างรอบคอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกรอง กลไกการแทรกซึมทะลุผ่าน ตลอดจนปัจจัยหรือตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบ

ในเรื่องนี้ มีการแสดงให้เห็นว่าหน้ากากผ้าและหน้ากากอนามัยไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคนาโนขนาดเล็กมาก ๆ (nanoparticles) ได้มากนักแต่ก็มีประสิทธิภาพในระดับต่าง ๆ กันในการป้องกันการแทรกซึมทะลุผ่านของอนุภาคที่มีขนาดระดับไมครอน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของหน้ากากกรองอากาศสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการกรองก็แตกต่างกันไปตามชนิดต่าง ๆ ของหน้ากากกรองอากาศ หน้ากากกรองอากาศมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเข้าแทรกซึมทะลุผ่านของสารพิษและอนุภาคที่ปนเปื้อนใด ๆ ได้มากกว่า ในทางกลับกันความสามารถในการเข้าถึงและความรู้สึกสวมใส่ไม่สบายในการใช้หน้ากากประเภทนี้ในการใช้งานทั่ว ๆ ไป ทำให้ไม่ได้รับความนิยมสักเท่าใดนัก

กลไกต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อการแทรกซึมทะลุผ่านหน้ากากของอนุภาคต่าง ๆ ปัจจัยต่าง ๆ หรือตัวแปรสภาพแวดล้อมภายนอกมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกการแทรกซึมทะลุผ่านและประสิทธิภาพในการกรอง ด้วยเหตุนี้ชนิดของหน้ากากที่เลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมด้วย ในบรรดาปัจจัยหรือตัวแปรที่มีผลเหล่านี้ขนาดของอนุภาคและอัตราการไหลของอากาศนับว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุด

การศึกษาวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมครอนแล้ว แรงโน้มถ่วงของโลก แรงเฉื่อย และการสกัตกกันเป็นกลไกที่มีความโดดเด่นมากที่สุด แต่สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมครอนแล้วกลไกการแพร่กระจายมีความโดดเด่นมากกว่า นอกจากนี้กลไกแรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิตได้รับผลกระทบน้อยจากขนาดของอนุภาค **ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ถึงประมาณ 300 นาโนเมตร** แต่จะได้รับผลกระทบมากกว่าจากอัตราการไหลของอากาศ ในกรณีที่อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำ ๆ กลไกแรงดึงดูดจากไฟฟ้าสถิตและกลไกการแพร่กระจายจะมีความโดดเด่นมากกว่า แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศให้สูงขึ้นกลไกการสกัตกกันก็จะมีประสิทธิภาพมากกว่า อย่างไรก็ตามปัจจัยอื่น ๆ มีผลกระทบน้อย แต่เมื่อมีการเพิ่มความชื้น อุณหภูมิ ความถี่ (ของการหายใจ) สูงขึ้น หรือการเปลี่ยนการไหลของอากาศให้เป็นการไหลวนเป็นวงกลมประสิทธิภาพในการกรองก็จะลดลง ในขณะที่การเพิ่มช่วงระยะเวลาในการกรองของหน้ากากทำให้ประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้คุณสมบัติของเส้นใยตัวกรองในหน้ากากก็เป็นสิ่งสำคัญ ในขณะที่การเพิ่มความหนาและจำนวนชั้นกรอง ความหนาแน่นของการบรรจุเส้นใยในตัวกรอง ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในเส้นใยตัวกรอง รวมทั้งการลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยตัวกรองทำให้ประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มขึ้น

นอกเหนือจากกลไกต่าง ๆ ตลอดจนปัจจัยภายนอกและลักษณะเฉพาะตัวของเส้นใยตัวกรองจะมีผลต่อประสิทธิภาพของการกรองแล้วยังมีอีกเรื่องหนึ่งที่เกี่ยวข้อง นั่นก็คือการปิดแน่นชิดกับใบหน้าของหน้ากากเนื่องมาจากลักษณะสูงต่ำของโครงสร้างใบหน้าที่แตกต่างกันของแต่ละคนหรือปลดหน้ากากออก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเครื่องช่วยหายใจในระหว่างที่ผู้สวมใส่นอนหลับ นำไปสู่การรั่วซึมซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของหน้ากากลดลงอย่างมาก เมื่อพิจารณาถึงข้อดีข้อด้อยและศักยภาพของหน้ากากชนิดต่าง ๆ แล้ว ดูเหมือนว่ามีสิ่งที่จะต้องทำอีกมากในเรื่องนี้เพื่อที่จะประดิษฐ์คิดค้นหน้ากากชนิด

พิเศษที่ตอบสนองความต้องการทั้งในด้านประสิทธิภาพการกรองที่เพิ่มขึ้น สวมใส่ได้สบายมากขึ้น ตลอดจนสามารถเข้าถึงได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นเรื่องที่สามารถเข้าใจได้ว่าเนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ตลอดจนปัจจัยด้านสรีระวิทยาของมนุษย์ที่หลากหลายรวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ คงจะไม่มีหน้ากากชนิดใดที่ออกแบบประสพความสำเร็จสามารถตอบโจทก์ทุกอย่างได้ครบถ้วน

สำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคต สามารถใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ด้านการพิมพ์ 3 มิติในการจัดเตรียมหน้ากากในสถานการณ์การแยกกักตัวและการขาดแคลนหน้ากาก นอกจากนี้การใช้เส้นใยนาโน (nanofibers) ให้มากขึ้นจะสามารถช่วยพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของหน้ากากในสภาพการณ์ต่าง ๆ ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ประโยชน์จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มากขึ้นในการตรวจวัดประสิทธิภาพของหน้ากากจะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องลงได้

คำประกาศเกี่ยวกับผลประโยชน์เชิงแข่งขัน (Declaration of competing interest)

ผู้เขียนแถลงว่าไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนใด ๆ

เชิงอรรถ (Footnotes)

การสอบทาน (peer review) เป็นความรับผิดชอบของบริษัท KeAi Communications Co., Ltd.

เอกสารอ้างอิง (References)

1. McDonald F. Facemask use for community protection from air pollution disasters: an ethical overview and framework to guide agency decision making. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2020;43:101376. [[Google Scholar](#)]
2. Bunyan D., Ritchie L., Jenkins D., Coia J. Respiratory and facial protection: a critical review of recent literature. *J. Hosp. Infect.* 2013;85(3):165–169. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
3. Cheng V.C. The role of community-wide wearing of face mask for control of coronavirus disease 2019 (COVID-19) epidemic due to SARS-CoV-2. *J. Infect.* 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
4. Burnett R. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 2018;115(38):9592–9597. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
5. Subbarao K., Mahanty S. Respiratory virus infections: Understanding COVID-19. *Immunity.* 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
6. Mahdavi A. Concordia University; 2013. Efficiency Measurement of N95 Filtering Facepiece Respirators against Ultrafine Particles under Cyclic and Constant Flows. [[Google Scholar](#)]
7. Bayersdorfer J., Giboney S., Martin R., Moore A., Bartles R. Novel manufacturing of simple masks in response to international shortages: bacterial and particulate filtration efficiency testing. *Am. J. Infect. Contr.* 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

8. Li Y., Leung P., Yao L., Song Q., Newton E. Antimicrobial effect of surgical masks coated with nanoparticles. *J. Hosp. Infect.* 2006;62(1):58–63. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
9. Ogunsona E.O., Muthuraj R., Ojogbo E., Valerio O., Mekonnen T.H. Engineered nanomaterials for antimicrobial applications: a review. *Appl. Mater. Today*. 2020;18:100473. [[Google Scholar](#)]
10. Martin S.B., Jr., Moyer E.S. Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 2000;15(8):609–617. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
11. McCullough N., Brosseau L., Vesley D. Collection of three bacterial aerosols by respirator and surgical mask filters under varying conditions of flow and relative humidity. *Ann. Occup. Hyg.* 1997;41(6):677–690. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
12. Richardson A.W., Eshbaugh J.P., Hofacre K.C., Gardner P.D. BATTELLE MEMORIAL INST COLUMBUS OH; 2006. Respirator Filter Efficiency Testing against Particulate and Biological Aerosols under Moderate to High Flow Rates. [[Google Scholar](#)]
13. Yi L., Fengzhi L., Qingyong Z. Numerical simulation of virus diffusion in facemask during breathing cycles. *Int. J. Heat Mass Tran.* 2005;48(19–20):4229–4242. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
14. Kähler C.J., Hain R. Fundamental protective mechanisms of face masks against droplet infections. *J. Aerosol Sci.* 2020:105617. [[Google Scholar](#)]
15. Hiragond C.B., Kshirsagar A.S., Dhapte V.V., Khanna T., Joshi P., More P.V. Enhanced anti-microbial response of commercial face mask using colloidal silver nanoparticles. *Vacuum*. 2018;156:475–482. [[Google Scholar](#)]
16. Hashmi M., Ullah S., Kim I.S. Copper oxide (CuO) loaded polyacrylonitrile (PAN) nanofiber membranes for antimicrobial breath mask applications. *Curr. Res. Biotechnol.* 2019;1:1–10. [[Google Scholar](#)]
17. Rengasamy S., Eimer B., Shaffer R.E. Simple respiratory protection—evaluation of the filtration performance of cloth masks and common fabric materials against 20–1000 nm size particles. *Ann. Occup. Hyg.* 2010;54(7):789–798. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
18. Leung N.H. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nat. Med.* 2020;26(5):676–680. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
19. Konda A., Prakash A., Moss G.A., Schmoldt M., Grant G.D., Guha S. Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano*. 2020;14(5):6339–6347. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
20. Rubio-Romero J.C., del Carmen Pardo-Ferreira M., García J.A.T., Calero-Castro S. Safety Science; 2020. Disposable Masks: Disinfection and Sterilization for Reuse, and Non-certified

- Manufacturing, in the Face of Shortages during the COVID-19 Pandemic. 104830. [\[PMC free article\]](#) [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
21. Aragaw T.A. Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario. *Mar. Pollut. Bull.* 2020;111517. [\[PMC free article\]](#) [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 22. Luan P.T., Ching C.T.-S. Archives of Medical Research; 2020. A Reusable Mask for Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) [\[PMC free article\]](#) [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 23. Yao B.-g., Wang Y.-x., Ye X.-y., Zhang F., Peng Y.-l. Impact of structural features on dynamic breathing resistance of healthcare face mask. *Sci. Total Environ.* 2019;689:743–753. [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 24. Milton D.K., Fabian M.P., Cowling B.J., Grantham M.L., McDevitt J.J. Influenza virus aerosols in human exhaled breath: particle size, culturability, and effect of surgical masks. *PLoS Pathog.* 2013;9(3) [\[PMC free article\]](#) [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 25. Cowling B., Zhou Y., Ip D., Leung G., Aiello A. Face masks to prevent transmission of influenza virus: a systematic review. *Epidemiol. Infect.* 2010;138(4):449–456. [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 26. Johnson D., Druce J.D., Birch C., Grayson M.L. A quantitative assessment of the efficacy of surgical and N95 masks to filter influenza virus in patients with acute influenza infection. *Clin. Infect. Dis.* 2009;49(2):275–277. [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 27. Bałazy A., Toivola M., Adhikari A., Sivasubramani S.K., Reponen T., Grinshpun S.A. Do N95 respirators provide 95% protection level against airborne viruses, and how adequate are surgical masks? *Am. J. Infect. Contr.* 2006;34(2):51–57. [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 28. Batty J.A. Google Patents; 1997. Face Mask Safety Shield. [\[Google Scholar\]](#)
 29. Mostaghimi A. Regulatory and safety considerations in deploying a locally fabricated, reusable, face shield in a hospital responding to the COVID-19 pandemic. *Med.* 2020 [\[Google Scholar\]](#)
 30. Bailar J., Burke D.S., Brosseau L., Cohen H., Gallagher E., Gensheimer K. Institute of Medicine, National Academies Press; Washington [DC]: 2006. Reusability of Facemasks during an Influenza Pandemic. [\[Google Scholar\]](#)
 31. Qian Y., Willeke K., Grinshpun S.A., Donnelly J., Coffey C.C. Performance of N95 respirators: filtration efficiency for airborne microbial and inert particles. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1998;59(2):128–132. [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)
 32. Willeke K., Qian Y. Tuberculosis control through respirator wear: performance of national Institute for occupational safety and health-regulated respirators. *Am. J. Infect. Contr.* 1998;26(2):139–142. [\[PubMed\]](#) [\[Google Scholar\]](#)

33. Rengasamy S., Zhuang Z., Roberge R. Particulate respiratory protection—Overview, emerging issues and research needs. *Protect. Dev.: Types, Uses Saf.* 2010;131–160. [[Google Scholar](#)]
34. Rodriguez-Martinez C.E., Sossa-Briceño M.P., Cortés-Luna J.A. Decontamination and reuse of N95 filtering facemask respirators: a systematic review of the literature. *Am. J. Infect. Contr.* 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
35. Zhou S.S., Lukula S., Chiossone C., Nims R.W., Suchmann D.B., Ijaz M.K. Assessment of a respiratory face mask for capturing air pollutants and pathogens including human influenza and rhinoviruses. *J. Thorac. Dis.* 2018;10(3):2059. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
36. Kim J.-H., Wu T., Powell J.B., Roberge R.J. Physiologic and fit factor profiles of N95 and P100 filtering facepiece respirators for use in hot, humid environments. *Am. J. Infect. Contr.* 2016;44(2):194–198. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
37. Gardner P.D., Eshbaugh J.P., Harpest S.D., Richardson A.W., Hofacre K.C. Viable viral efficiency of N95 and P100 respirator filters at constant and cyclic flow. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2013;10(10):564–572. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
38. Pearce B.R.H.J.M. 2020. Conversion of self-contained breathing apparatus mask to open source powered air-purifying particulate respirator for fire fighter COVID-19 response. Preprints. [[Google Scholar](#)]
39. Meyer S.D., Raven P.B. Google Patents; 1987. Self-contained Breathing Apparatus. [[Google Scholar](#)]
40. Dreger R.W., Jones R.L., Petersen S.R. Effects of the self-contained breathing apparatus and fire protective clothing on maximal oxygen uptake. *Ergonomics.* 2006;49(10):911–920. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
41. Ungar W.D., Grimsley T.L., Mishkin B. Google Patents; 2010. Full Face Respirator Mask. [[Google Scholar](#)]
42. Konda A., Prakash A., Moss G.A., Schmoldt M., Grant G.D., Guha S. Aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano.* 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
43. Li Y. In vivo protective performance of N95 respirator and surgical facemask. *Am. J. Ind. Med.* 2006;49(12):1056–1065. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
44. Long Y. Effectiveness of N95 respirators versus surgical masks against influenza: a systematic review and meta-analysis. *J. Evid. Base Med.* 2020;13(2):93–101. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

45. Kang P.K., Shah D.O. Filtration of nanoparticles with dimethyldioctadecylammonium bromide treated microporous polypropylene filters. *Langmuir*. 1997;13(6):1820–1826. [[Google Scholar](#)]
46. Mayhew D.J. Google Patents; 1971. Filtration Mask. [[Google Scholar](#)]
47. Akalin M., Usta I., Kocak D., Ozen M. *Medical and Healthcare Textiles*. Elsevier; 2010. Investigation of the filtration properties of medical masks; pp. 93–97. [[Google Scholar](#)]
48. Huang J., Huang V. Evaluation of the efficiency of medical masks and the creation of new medical masks. *J. Int. Med. Res.* 2007;35(2):213–223. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
49. Madsen P.O., Madsen R.E. A study of disposable surgical masks. *Am. J. Surg.* 1967;114(3):431–435. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
50. Skaria S.D., Smaldone G.C. Respiratory source control using surgical masks with nanofiber media. *Ann. Occup. Hyg.* 2014;58(6):771–781. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
51. Yang A. Thermal management in nanofiber-based face mask. *Nano Lett.* 2017;17(6):3506–3510. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
52. Kharaghani D. Preparation and in-vitro assessment of hierarchical organized antibacterial breath mask based on polyacrylonitrile/silver (PAN/AgNPs) nanofiber. *Nanomaterials*. 2018;8(7):461. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
53. Wang N., Cai M., Yang X., Yang Y. Electret nanofibrous membrane with enhanced filtration performance and wearing comfortability for face mask. *J. Colloid Interface Sci.* 2018;530:695–703. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
54. Ullah S. Reusability comparison of melt-blown vs. Nanofiber face mask filters for use in the coronavirus pandemic. *ACS Appl. Nano Mater.* 2020 [[Google Scholar](#)]
55. Banerjee S.S., Burbine S., Kodihalli Shivaprakash N., Mead J. 3D-printable PP/SEBS thermoplastic elastomeric blends: preparation and properties. *Polymers*. 2019;11(2):347. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
56. Ishack S., Lipner S.R. Applications of 3D printing technology to address COVID-19 related supply shortages. *Am. J. Med.* 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
57. Swennen G.R., Pottel L., Haers P.E. Custom-made 3D-printed face masks in case of pandemic crisis situations with a lack of commercially available FFP2/3 masks. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
58. Cai M., Li H., Shen S., Wang Y., Yang Q. Customized design and 3D printing of face seal for an N95 filtering facepiece respirator. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2018;15(3):226–234. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]

59. Provenzano D. George Washington University; 2020. Rapid Prototyping of Reusable 3D-Printed N95 Equivalent Respirators at the. [[Google Scholar](#)]
60. Liu D. 2020. Adapting Re-useable Elastomeric Respirators to Utilise Anaesthesia Circuit Filters Using a 3D-printed Adaptor - a Potential Alternative to Address N95 Shortages during the COVID-19 Pandemic. *Anaesthesia*. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
61. Guha S., McCaffrey B., Hariharan P., Myers M.R. Quantification of leakage of sub-micron aerosols through surgical masks and facemasks for pediatric use. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2017;14(3):214-223. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
62. Hinds W.C. John Wiley & Sons; 1999. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. [[Google Scholar](#)]
63. Janssen L. Principles of physiology and respirator performance. *Occup. Health Saf.* 2003;72(6):73-81. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
64. Brown R.C. Pergamon; 1993. Air Filtration: an Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters. [[Google Scholar](#)]
65. Lee K., Liu B. On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* 1980;30(4):377-381. [[Google Scholar](#)]
66. Leonard S. Preliminary findings of control of dispersion of aerosols and droplets during high velocity nasal insufflation therapy using a simple surgical mask: Implications for high flow nasal cannula. *Chest*. 2020 [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
67. Fjeld R.A., Owens T.M. The effect of particle charge on penetration in an electret filter. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1988;24(4):725-731. [[Google Scholar](#)]
68. Moradmand P.A., Khaloozadeh H. 2017 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA); 2017. An experimental study of modeling and self-tuning regulator design for an electro-hydro servo-system; pp. 126-131. IEEE. [[Google Scholar](#)]
69. Donaldson K., Stone V., Clouter A., Renwick L., MacNee W. vol. 58. 2001. Ultrafine Particles *Occup Environ Med*; pp. 211-216. Find this article online. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
70. Warheit D.B., Webb T.R., Reed K.L., Frerichs S., Sayes C.M. Pulmonary toxicity study in rats with three forms of ultrafine-TiO₂ particles: differential responses related to surface properties. *Toxicology*. 2007;230(1):90-104. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
71. Boskovic L., Agranovski I.E., Braddock R.D. Filtration of nanosized particles with different shape on oil coated fibres. *J. Aerosol Sci.* 2007;38(12):1220-1229. [[Google Scholar](#)]

72. Dahneke B. The capture of aerosol particles by surfaces. *J. Colloid Interface Sci.* 1971;37(2):342–353. [[Google Scholar](#)]
73. Eshbaugh J.P., Gardner P.D., Richardson A.W., Hofacre K.C. N95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2008;6(1):52–61. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
74. Wang H.-C., Kasper G. Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles. *J. Aerosol Sci.* 1991;22(1):31–41. [[Google Scholar](#)]
75. Kim C.S., Bao L., Okuyama K., Shimada M., Niinuma H. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. *J. Nanoparticle Res.* 2006;8(2):215–221. [[Google Scholar](#)]
76. Heim M., Mullins B., Kasper G. Comment on: penetration of ultrafine particles and ion clusters through wire screens by Ichitsubo et al. *Aerosol. Sci. Technol.* 2006;40(2):144–145. [[Google Scholar](#)]
77. Warheit D.B., Sayes C.M., Reed K.L., Swain K.A. Health effects related to nanoparticle exposures: environmental, health and safety considerations for assessing hazards and risks. *Pharmacol. Ther.* 2008;120(1):35–42. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
78. Willeke K., Qian Y., Donnelly J., Grinshpun S., Ulevicius V. Penetration of airborne microorganisms through a surgical mask and a dust/mist respirator. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1996;57(4):348–355. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
79. Kousaka Y., Okuyama K., Shimada M., Takii Y. Development of a method for testing very high-efficiency membrane filters for ultrafine aerosol particles. *J. Chem. Eng. Jpn.* 1990;23(5):568–574. [[Google Scholar](#)]
80. Yuasa H. Industrial health; 2014. Breathing Simulator of Workers for Respirator Performance Test. [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
81. Xiao X., Qian L. Investigation of humidity-dependent capillary force. *Langmuir.* 2000;16(21):8153–8158. [[Google Scholar](#)]
82. Givvehchi R., Tan Z. The effect of capillary force on airborne nanoparticle filtration. *J. Aerosol Sci.* 2015;83:12–24. [[Google Scholar](#)]
83. Roberge R., Benson S., Kim J.-H. Thermal burden of N95 filtering facepiece respirators. *Ann. Occup. Hyg.* 2012;56(7):808–814. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
84. Shokri A., Golbabaie F., Seddigh-Zadeh A., Baneshi M.-R., Asgarkashani N., Faghihi-Zarandi A. Evaluation of physical characteristics and particulate filtration efficiency of surgical masks used in Iran's hospitals. *Int. J. Occup. Hyg.* 2015;7(1):10–16. [[Google Scholar](#)]

85. Huang S.-H., Chen C.-W., Kuo Y.-M., Lai C.-Y., McKay R., Chen C.-C. Factors affecting filter penetration and quality factor of particulate respirators. *Aerosol Air Qual. Res.* 2013;13(1):162–171. [[Google Scholar](#)]
86. Sanchez E. 2010. Filtration Efficiency of Surgical Masks. [[Google Scholar](#)]
87. Lei Z., Yang J., Zhuang Z., Roberge R. Simulation and evaluation of respirator facesal leaks using computational fluid dynamics and infrared imaging. *Ann. Occup. Hyg.* 2013;57(4):493–506. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
88. Pope S.B. IOP Publishing; 2001. Turbulent Flows. [[Google Scholar](#)]
89. Lei Z., Yang J., Zhuang Z. Contact pressure study of N95 filtering face-piece respirators using finite element method. *Computer-Aided Des. Appl.* 2010;7(6):847–861. [[Google Scholar](#)]
90. Zhang X., Li H., Shen S., Cai M. Investigation of the flow-field in the upper respiratory system when wearing N95 filtering facepiece respirator. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2016;13(5):372–382. [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]
91. Karadimos A., Ocone R. The effect of the flow field recalculation on fibrous filter loading: a numerical simulation. *Powder Technol.* 2003;137(3):109–119. [[Google Scholar](#)]
92. Davies C.N. 1973. Air Filtration. [[Google Scholar](#)]
93. Walsh D.C. Loughborough University; 1995. The Behaviour of Electrically Active and Prefilter Fibrous Filters under Solid Aerosol Load. [[Google Scholar](#)]
94. Y. Rao et al., "Investigation of water vapor condensation on the inner surface of N95 filtering facepiece".
95. Zhang X., Li H., Shen S., Rao Y., Chen F. An improved FFR design with a ventilation fan: CFD simulation and validation. *PloS One*. 2016;11(7) [[PMC free article](#)] [[PubMed](#)] [[Google Scholar](#)]