

डीजल और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए स्केल अप
बेलनाकार नोजल में गुहिकायन प्रवाह का संख्यात्मक अध्ययन
Numerical Study of Cavitation Flow in Scaled up Cylindrical Nozzle for Diesel and Waste
Cooking Oil-based Bio-diesel

देवर्षि शिर्के, मेहुल बंभानिया एवं निकुल पटेल

Devarshi M Shirke, Mehul Bambhanian and Nikul Patel

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology & Engineering,
The Maharaja Sayajirao University of Baroda, Vadodara-390002, India

devarshishirke@gmail.com, mehul.bambhanian-med@msubaroda.ac.in,

n.k.patel-med@msubaroda.ac.in

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19667264>

सारांश

ईंधन परमाणुकरण की गुणवत्ता, आंतरिक नोजल प्रवाह से काफी प्रभावित होती है; विशेष रूप से उच्च दबाव इंजेक्शन स्थितियों के तहत जो गुहिकायन उत्पन्न करती है। गुहिकायन बुलबुले के गठन को चित्रित करना नोजल के छोटे आयामों के कारण चुनौतीपूर्ण है, जो प्रायोगिक अध्ययन के लिए दृश्य पहुंच को प्रतिबंधित करता है, और जटिल, उतार-चढ़ाव वाले स्थानिक और लौकिक पैरामीटर जो संख्यात्मक मॉडलिंग को जटिल बनाते हैं [2] गुहिकायन व्यवहार की भविष्यवाणी के लिए सटीक संख्यात्मक मॉडल आवश्यक हैं। इस अध्ययन में, एक बेलनाकार नोजल के भीतर गुहिकायन प्रवाह की जांच के लिए कम्प्यूटेशनल द्रव गतिशीलता (CFD) विश्लेषण आयोजित किया गया था। द्रव का आयतन (VOF) मल्टीफेज मॉडल, $k-\omega$ एसएसटी (SST) टर्बुलेंस मॉडल और ज्वार्ट-गेरबर-बेलमरी (ZGB) गुहिकायन मॉडल के साथ संयुक्त रूप से नियोजित किया गया था। 1 से 4.5 बार तक के इंजेक्शन दबाव के लिए सिमुलेशन किए गए। वाष्प मात्रा अंश के आधार पर एक गुणात्मक तुलना ने प्रायोगिक अवलोकनों के अनुरूप तीन अलग-अलग गुहिकायन चरणों – गुहिकायन शुरुआत, विकास और सुपर-गुहिकायन की पहचान की। ईंधन द्रव्यमान प्रवाह दर का उपयोग करके मात्रात्मक तुलना ने प्रयोगात्मक डेटा की तुलना में CFD परिणामों में थोड़ा अधिक अनुमान दिखाया। इस विसंगति को दूर करने के लिए, नोजल आउटलेट पर वाष्प अंश वितरण के आधार पर एक क्षेत्र सुधार कारक प्रस्तावित किया गया था, जिससे CFD और प्रयोगात्मक परिणामों के बीच विचलन को 3% के भीतर कम किया जा सके। अध्ययन ने आगे डीजल ईंधन और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल-आधारित जैव-डीजल के गुहिकायन व्यवहार का पता लगाया। परिणामों से पता चलता है कि जैव-डीजल समान गुहिकायन चरणों को प्रदर्शित करता है, हालांकि डीजल ईंधन की तुलना में थोड़ा अधिक इंजेक्शन दबाव पर। [14]

Abstract

The quality of fuel atomization is significantly influenced by the internal nozzle flow, particularly under high-pressure injection conditions that induce cavitation. Characterizing cavitation bubble formation is challenging due to the tiny dimensions of the nozzle, which restrict visual access for experimental studies, and the complex, fluctuating spatial and temporal parameters that complicate

numerical modelling. Accurate numerical models are essential for predicting cavitation behaviour. In this study, computational fluid dynamics (CFD) analysis was conducted to investigate cavitation flow within a cylindrical nozzle. The Volume of Fluid (VOF) multiphase model, combined with the $k-\omega$ SST turbulence model and the Zwart-Gerber-Belamri cavitation model, was employed. Simulations were carried out for injection pressures ranging from 1 to 4.5 bar. A qualitative comparison, based on vapor volume fraction, identified three distinct cavitation stages—cavitation inception, development, and super-cavitation—consistent with experimental observations. Quantitative comparison using fuel mass flow rate showed a slight overestimation in CFD results compared to experimental data. To address this discrepancy, an area correction factor was proposed based on the vapor fraction distribution at the nozzle outlet, reducing the deviation between CFD and experimental results to within 3%. The study further explored the cavitation behaviour of diesel fuel and waste cooking oil-based biodiesel. Results reveal that biodiesel exhibits similar cavitation stages, albeit at slightly higher injection pressures compared to diesel fuel.

मुख्य शब्द: ईंधन इंजेक्टर नोजल, गुहिकायन, बेलनाकार नोजल, वीओएफ, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल।

Keywords: Fuel injector nozzle, Cavitation, Cylindrical nozzle, VOF, Waste cooking oil based bio-diesel.

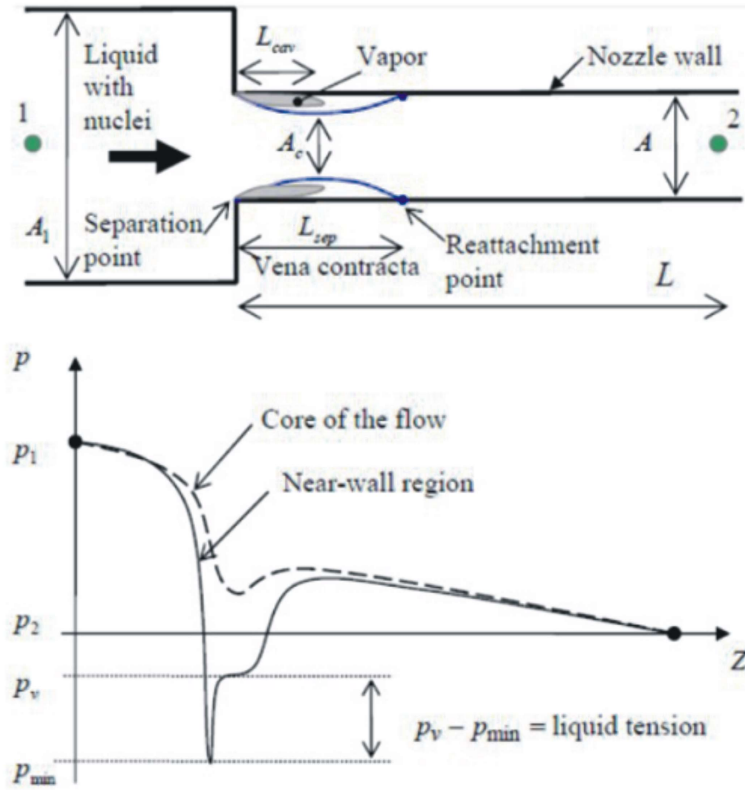
परिचय

हाइड्रोडायनमिक गुहिकायन तब होता है जब एक तरल में दबाव उसके वाष्प दबाव से नीचे गिर जाता है, जिससे वाष्प बुलबुले का निर्माण होता है। यह घटना प्रवाह वेग, दबाव भिन्नताओं और प्रणाली की ज्यामिति जैसे कारकों से प्रभावित होती है [1]। बुलबुले आमतौर पर तरल में मौजूद छोटे नाभिक के आसपास बनते हैं, जैसे कि सतह खुरदरापन के भीतर सूक्ष्म बुलबुले या फंसे हुए गैस क्षेत्र [2]।

चूंकि तरल एक नोजल या प्रतिबंध के माध्यम से बहता है, गुहिकायन विभिन्न चरणों में विकसित हो सकता है। प्रारंभ में, प्रवाह एक गैर-गुहिकायन अवस्था में रहता है, लेकिन जैसे-जैसे दबाव आगे गिरता है, गुहिकायन की शुरुआत होती है। यदि परिस्थितियाँ बुलबुले की वृद्धि को बढ़ावा देती हैं, तो प्रवाह ऐसी प्रणालियों में परिवर्तित हो जाता है जैसे कि गुहिकायन वृद्धि, सुपर गुहिकायन, और चरम मामलों में, हाइड्रोलिक पिलप। इन बुलबुलों का नीचे की ओर गिरना स्थानीयकृत तरंगों को उत्पन्न कर सकता है, जेट की विशेषताओं को बदलते हुए और मिश्रण को बढ़ाने में मदद कर सकता है।

हालांकि गुहिकायन को अक्सर एक हानिकारक प्रभाव के रूप में देखा जाता है, जो पंप और जहाज के पेंच जैसे हाइड्रोलिक मशीनरी में सामग्री का क्षय और संरचनात्मक थकावट का कारण बनता है, यह इसके लाभकारी अनुप्रयोग भी हैं। उदाहरण के लिए, ईंधन इंजेक्शन प्रणाली में, नियंत्रित गुहिकायन ईंधन के परमाणुकरण में सुधार कर सकता है, जिससे बेहतर दहन दक्षता और कम उत्सर्जन होता है। इसके अलावा, गुहिकायन द्वारा उत्पन्न टर्बुलेंस स्प्रे प्रदर्शन को बढ़ा सकता है, जो जैव-डीजल जैसे उच्च विषाक्तता वाले ईंधनों के लिए विशेष रूप से उपयोगी है, जिन्हें आमतौर पर खराब स्प्रे विशेषताओं से प्रभावित किया जाता है।

ईंधन इंजेक्शन से परे, शोधकर्ता गुहिकायन के नए अनुप्रयोगों, जैसे कि जल उपचार, पायासीकरण, और बायोमेडिकल प्रक्रियाओं की खोज कर रहे हैं। ये नए उपयोग गुहिकायन की द्वि-स्वरूपता को एक चुनौती के रूप में और इंजीनियरिंग में नवाचार के लिए एक उपकरण के रूप में उजागर करते हैं।



चित्र 1: नोज़ल के व्यास में दबाव

संख्यात्मक मॉडलिंग और समस्या की परिभाषा

सभी नियंत्रक समीकरण को व्यावसायिक कम्प्यूटेशनल फ्लूइड डायनामिक्स कोड ANSYS-Fluent का उपयोग करके हल किया गया। उपयोग किए गए तरल पदार्थ; पानी, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित बायोडीज़ल और डीज़ल थे। तरल को उस तरल और इसके वाष्प से युक्त माना गया है। मल्टीफेज मॉडल VOF को मल्टीफेज प्रवाह के लिए उपयोग किया जाता है। तूफान के लिए, $k-\omega$ SST मॉडल का उपयोग किया गया। नोज़ल के अंदर गुह्य प्रवाह के लिए Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) मॉडल का उपयोग किया गया।

नियंत्रक समीकरण:

एकल-तरल मॉडल में, दो-चरण प्रवाह का संचालन द्रव्यमान और संवेग के संरक्षण समीकरणों के एक सेट द्वारा किया जाता है, जैसा कि नीचे दिया गया है:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \rho)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

जहाँ मिश्रण की घनत्व और श्यानता को तरल चरण के आयतन अंश के आधार पर गणना किया जाता है।

$$\rho = (1 - \alpha_l)\rho_v + \alpha_l\rho_l \quad (3)$$

$$\mu = (1 - \alpha_l)\mu_v + \alpha_l\mu_l \quad (4)$$

जहां ρ_v और ρ_l वाष्प चरण और तरल चरण के घनत्व हैं, और μ_v और μ_l क्रमशः वाष्प चरण और तरल चरण की चिपचिपाहट हैं। संवेग समीकरण में प्रभावी चिपचिपाहट को $\mu_{\text{eff}} = \mu_m + \mu_t$ के रूप में व्यक्त किया जाता है, जहां μ_m आणविक चिपचिपाहट है और μ_t अशांत चिपचिपाहट है जिसे मॉडल किया जाना चाहिए।

k- ϵ मॉडल्स

$$\mu_t = C_{\mu p} \frac{k^2}{\epsilon}$$

k- ω मॉडल्स

$$\mu_t = \alpha \rho \frac{k}{\omega}$$

इस मॉडल के साथ तरल और वाष्प के बीच चरण परिवर्तन का मूल्यांकन करने के लिए द्रव्यमान परिवहन समीकरण में एक स्रोत पद की आवश्यकता होती है।

$$\frac{\partial(\alpha_l\rho_l)}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha_l\rho_l U) R_c + R_e \quad (7)$$

इस मॉडल में वाष्प चरण का वॉल्यूम अंश (α_v) इस प्रकार दिया गया है:

$$\alpha_v = 1 - \alpha_l = \frac{\frac{4}{3}\pi R_b^3 n_0}{1 + \frac{4}{3}\pi R_b^3 n_0} \quad (8)$$

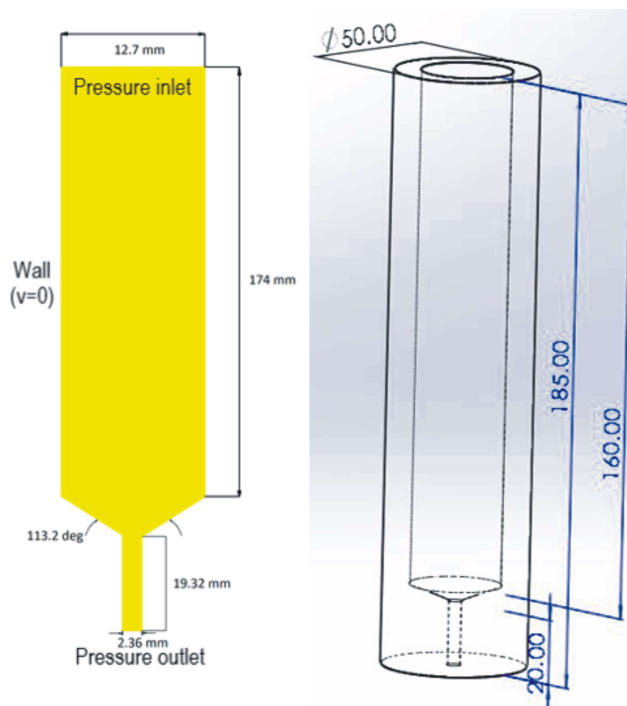
गुहिकायन संख्या (CN) को समीकरण (8) के द्वारा परिभाषित किया जाता है।

$$CN = \frac{P_{\text{back}} - P_{\text{vapour}}}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (9)$$

जहां, P_{back} = उस स्थान का दबाव जहां तरल छोड़ा जाता है, P_{vapour} = तरल का वाष्पीकरण दबाव, ρ = तरल का घनत्व, V = तरल की वास्तविक गति।

समस्या परिभाषा

नोजल ज्यामिति के लिए, Ansys Spaceclaim में द्विविम ज्यामिति बनाई गई है, जो चित्र 2 में दिखाई गई है। ज्यामिति को प्रयोग के लिए उपयोग किए गए त्रिविम ज्यामिति अक्रीलिक नोजल के संदर्भ में बनाया गया है। शीर्ष सतह तरल के लिए निवेश के रूप में कार्य करती है। पार्श्व सतहों के लिए कोई स्लिप स्थिति निर्धारित की गई है। नीचे नोजल क्षेत्र है, जहाँ गुहिकायन की उम्मीद है। सीमा स्थितियाँ दबाव आधारित प्रदान की गई हैं। इस अध्ययन में उपयोग किए गए तरल के गुण तालिका 1 में उल्लिखित हैं।



चित्र 2: नोजल का द्विविम ज्यामिति और त्रिविम ज्यामिति मॉडल

तालिका 1: इस अध्ययन में उपयोग की जाने वाली तरल की विशेषताएँ

तरल गुणधर्म	पानी	डीज़ल	डीज़ल और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीज़ल
तरल घनत्व (Liquid density) (ρ) (kg/m ³)	1000	830	886
तरल की काइनेमैटिक श्यानता (Kinematic viscosity of Liquid) (cP)	1	2.3	4.03
तरल की गतिशील श्यानता (Dynamic viscosity of Liquid) (Pa s)	0.000798	0.001517	0.00453
भाप का दबाव (Vapor pressure) (P_v) (Pa)	4000	2000	1000
सतही तनाव (Surface tension) (N/m)	0.072	0.025	0.0296

परिणाम और चर्चाएँ

जाली का प्रभाव विश्लेषण (Mesh Sensitivity)

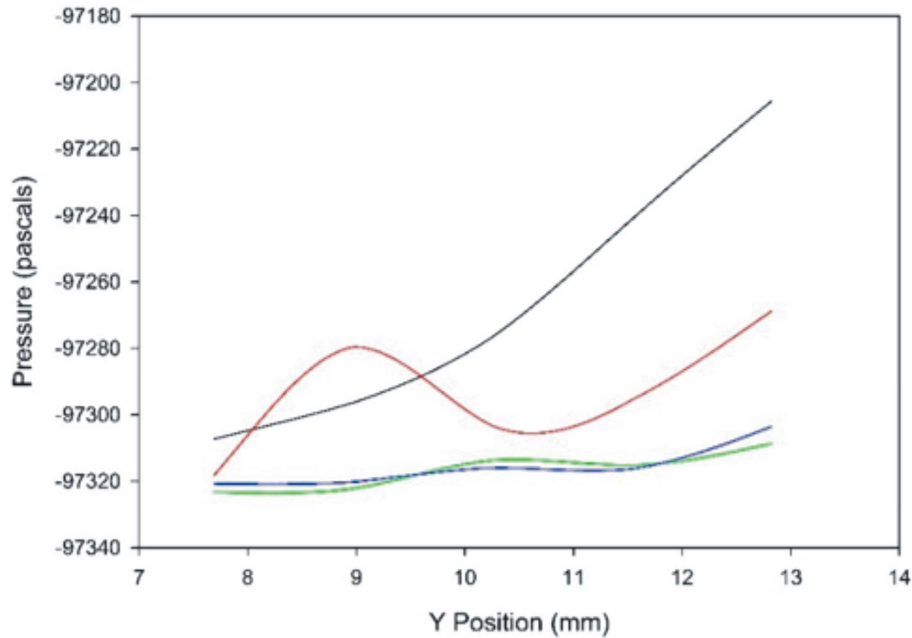
नोजल का व्यास 2.36 मिमी और लंबाई 19.32 मिमी वाली ज्यामिति द्विविम ज्यामिति है। परिणामों पर जाली (mesh) सेल (cell) संख्याओं के प्रभाव को कम करने के लिए जाली का प्रभाव विश्लेषण विश्लेषण किया गया है। चार विभिन्न सेल संख्याओं के साथ चार जाली बनाए गए हैं। तालिका 2 में चारों जाली प्रकारों की संख्या

दर्शाई गई है। सभी चार जाली में समान सीमा स्थितियों के साथ डेटा रिकॉर्ड किया गया है। पूरे विश्लेषण को तरल के रूप में पानी का उपयोग करके किया गया है। निवेशी दबाव 4.5 बार गेज (gauge) दबाव पर सेट किया गया है और निर्गम स्थितियाँ वायुमंडलीय स्थितियों पर हैं। नोजल के y -अक्ष (y-axis) पर दबाव को चित्र 3 में सभी चार जाली के लिए प्रदर्शित किया गया है। नोजल की आधी लंबाई पर नोजल के x -अक्ष (x-axis) पर पानी के वाष्प का आयतन अंश चित्र 4 में प्रदर्शित किया गया है। चित्र 3 में प्रदर्शित आलेख से स्पष्ट है कि M_1 और M_2 के दबाव मान काफी भिन्न हैं, जो दर्शाता है कि उनके पास जाली कोशिकाओं की संख्या अपर्याप्त है और इसलिए आगे के सुधार की आवश्यकता है। इसी प्रकार, M_2 और M_3 के लिए प्राप्त दबाव मानों में भी बड़ा विचलन है। M_3 और M_4 में दबाव मानों में विचलन छोटा है, इसलिए और सुधार परिणामों को प्रभावित नहीं करेगा। चित्र 4 में, नोजल की दीवारों के पास M_1 के लिए प्लॉट लाइन में अंतर है। M_2 और M_3 के लिए मान दीवार की सतह के पास स्पष्ट रूप से भिन्न होते हैं। इसके अलावा, M_3 और M_4 में भाप मात्रा अंश में अंतर बहुत न्यूनतम है। M_3 और M_4 में से, पूरी अध्ययन के लिए मेश M_3 को चुना गया है क्योंकि इसके लिए कम गणनात्मक समय की आवश्यकता होती है और प्राप्त परिणाम सटीक हैं।

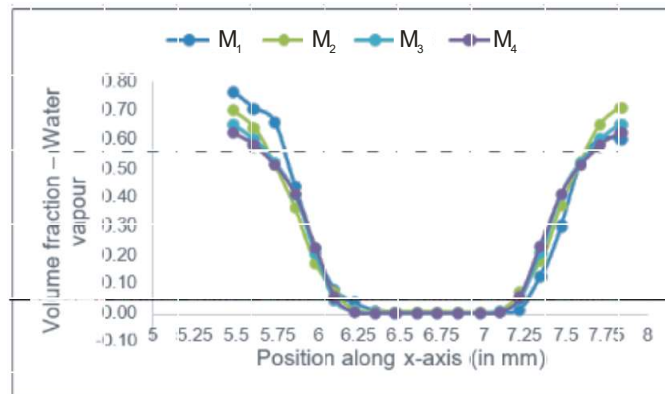
तालिका 2: प्रत्येक जाल में तत्वों की संख्या

Mesh	No. of Elements
M_1	47,736
M_2	58,891
M_3	1,02,638
M_4	2,28,643

— M_1 — M_2 — M_3 — M_4



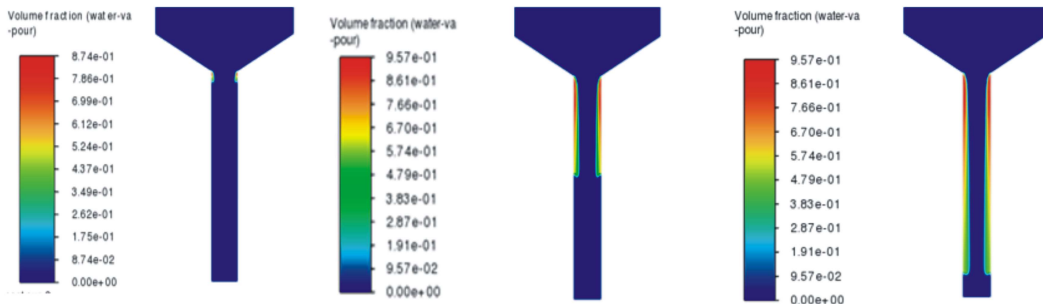
चित्र 3: y - अक्ष के साथ दबाव बनाम स्थिति का आलेख



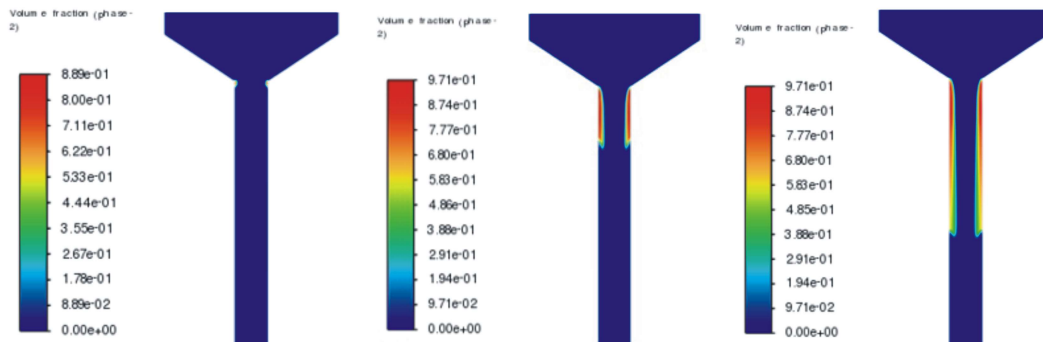
चित्र 4: जल वाष्प के मात्रा अंश बनाम x-अक्ष के साथ स्थिति का आलेख

विभिन्न तरल पदार्थों में गुहिकायन प्रवाह

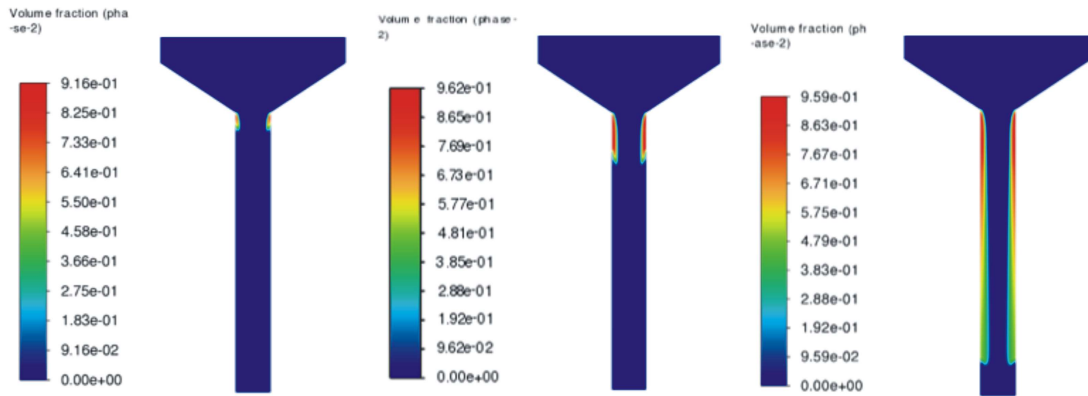
पानी, डीजल और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल का कार्यशील तरल के रूप में विभिन्न सीमा स्थितियों के तहत संख्यात्मक सिमुलेशन किए गए। सभी गणनाएँ स्थिर अवस्था की स्थिति में की गईं। दबाव वितरण, वाष्प आयतन अनुपात और वेग दिखाते हुए चित्र रिकॉर्ड किए गए। जल, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल और डीजल के आयतन अनुपात चित्रों में गुहिकायन का विकास स्पष्ट है, जैसा कि चित्र 5, 6 और 7 में दिखाये गये हैं। पानी के लिए, गुहिकायन की शुरुआत 2 बार के निवेशी दबाव पर होती है, और 4.5 बार पर सुपर गुहिकायन का अवलोकन होता है। इसी प्रकार, WCO जैव-डीजल में गुहिकायन की शुरुआत 2.6 बार पर होती है और सुपर गुहिकायन 3.4 बार पर होता है। डीजल के मामले में, गुहिकायन 2.3 बार पर शुरू होता है, जो 3.8 बार पर सुपर गुहिकायन की ओर बढ़ता है।



चित्र 5: (बाएँ से दाएँ) इनसेप्शन, वृद्धि और सुपर गुहिकायन पानी के लिए

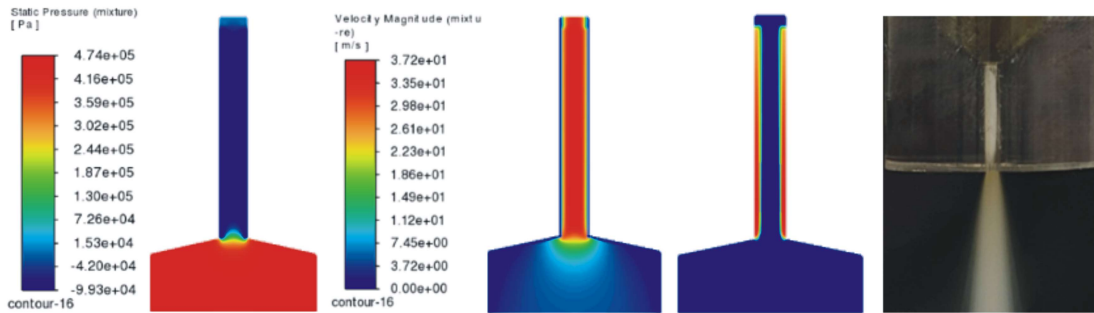


चित्र 6: (बाएँ से दाएँ) जैव-डीजल के तरल के रूप में इनसेप्शन, वृद्धि और सुपरगुहिकायन।

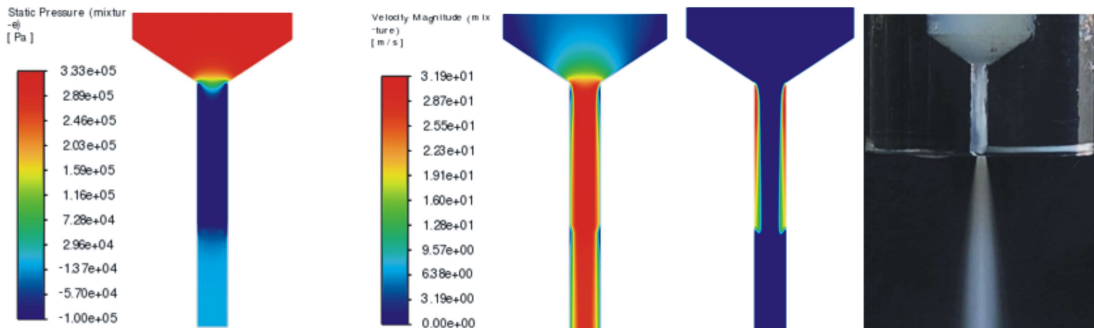


चित्र 7: (बाएं से दाएं) इनसेप्शन, वृद्धि और सुपरगुहिकायन के लिए डीजल तरल के रूप में प्रयोग के साथ तुलना

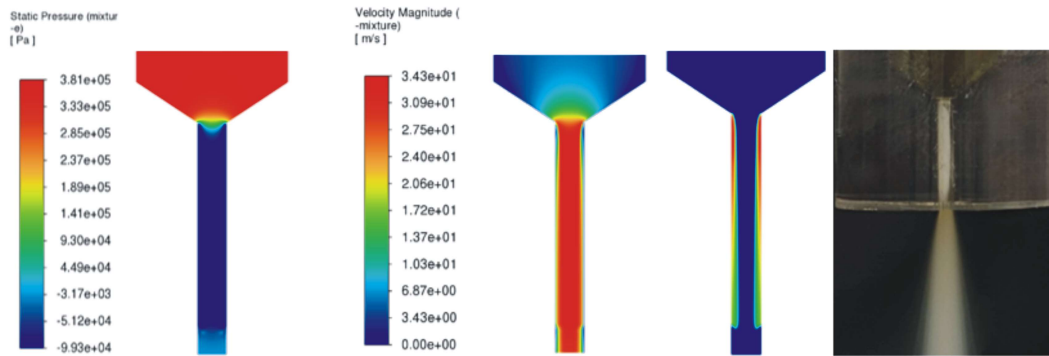
अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए सुपरगुहिकायन आकृति देता है कि डीजल के मुकाबले समान दबाव पर गुहिकायन क्लाउड की लंबाई छोटी है। नतीजतन, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए डीजल के समान गुहिकायन क्लाउड की लंबाई प्राप्त करने के लिए उच्च प्रव इंजेक्शन दबाव की आवश्यकता होती है। यह व्यवहार अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए कम संतृप्त वाष्प दबाव और उच्च विपचिपाहट के कारण होता है जो कि डीजल और पानी की तुलना में है। चित्र 8 सभी तीन तरल पदार्थों के लिए दबाव, वेग और वाष्प मात्रा अनुपात को दर्शाता है। प्रयोगात्मक चित्र वाष्प मात्रा अनुपात आकृतियों के साथ दिखाए गए हैं, प्राप्त परिणाम गुणात्मक रूप से समान हैं।



(a)



(b)

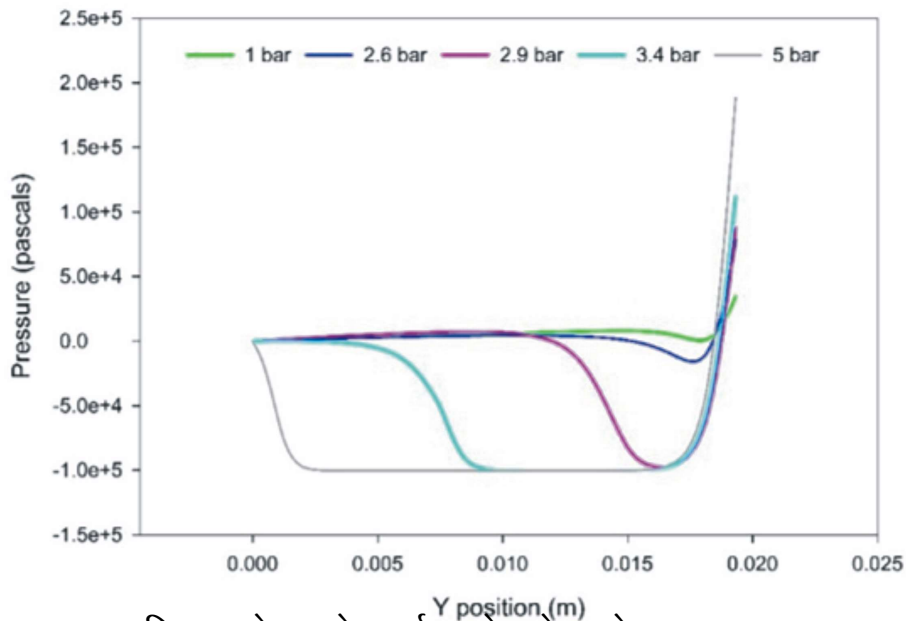


(c)

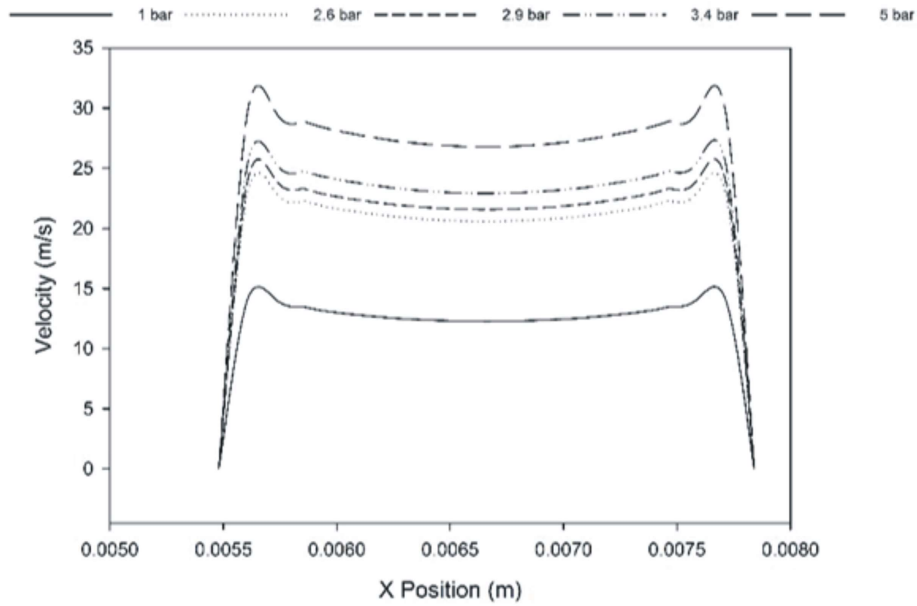
चित्र 8: दबाव, वेग, वाष्प मात्रा अंश और (a) जल, (b) WCO जैव-डीजल और (c) डीजल के लिए प्रयोगात्मक चित्र

दबाव अंतर का प्रभाव

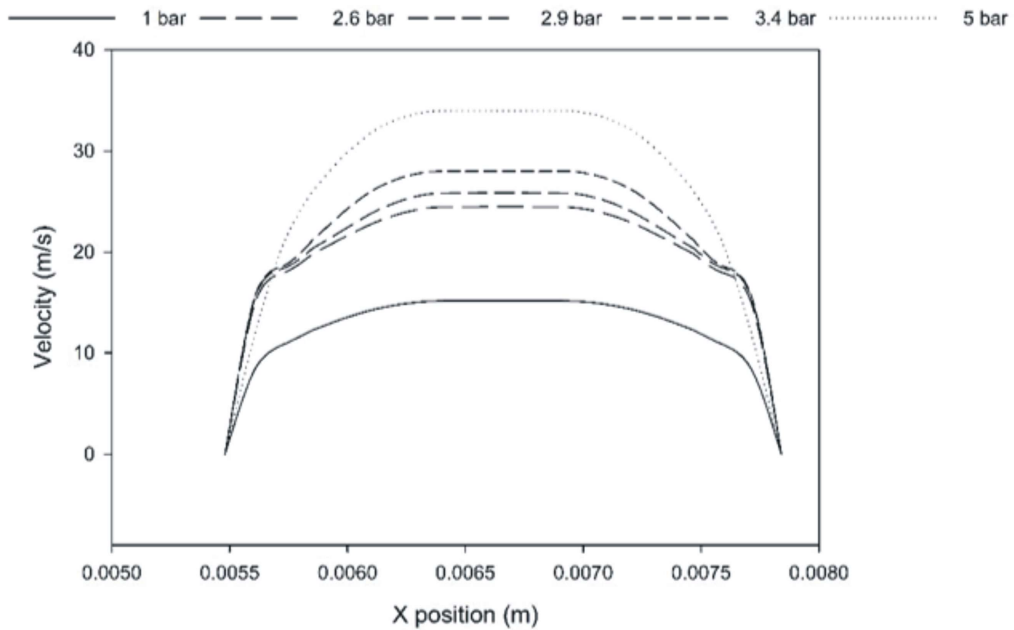
जब प्रवाह नोजल के माध्यम से गुजरता है, तो भूभाग में अचानक बदलाव के कारण प्रवाह नोजल के निवेश पर दीवार से अलग हो जाता है, जिससे प्रवाह में वेना कॉन्ट्रैक्टा उत्पन्न होती है। एक पुनः परिसंचरण क्षेत्र बनता है जहाँ दबाव तरल के त्वरण के कारण घटता है। दबाव संतृप्त वाष्प दबाव से भी नीचे गिर सकता है, जिससे तरल आंशिक रूप से अपने वाष्प रूप में परिवर्तित हो जाता है और बुलबुले या वाष्प गुहा उत्पन्न होती है। जैसे-जैसे इंजेक्शन का दबाव बढ़ता है, पुनः परिसंचरण क्षेत्र नोजल के निर्गम की ओर और फैलता है। चित्र 9 में, 2.6 बार के लिए दबाव प्रोफाइल में 0.016 मीटर और 0.018 मीटर के बीच, नोजल के निवेश के पास एक गिरावट देखी जाती है, जहाँ दबाव अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के संतृप्त वाष्प दबाव के थोड़ा नीचे गिर जाता है। इस गिरावट को पुनः परिसंचरण क्षेत्र के गठन के लिए जिम्मेदार ठहराया जाता है। इंजेक्शन दबाव में आगे वृद्धि के साथ, पुनः परिसंचरण क्षेत्र फैलता है और नोजल के निर्गम की ओर बढ़ता है, जैसा कि 2.9 बार, 3.4 बार और 5 बार के लिए दबाव प्रोफाइल में स्पष्ट है।



चित्र 9: नोजल के ऊर्ध्वाधर केन्द्र रेखा के साथ दबाव



(a)



(b)

चित्र 10: (a) निवेश पर वेग, (b) निर्गम पर वेग

जैसे ही तरल तेजी से गति करता है, वहाँ गुहिका के भीतर वाष्प उत्पन्न होती है, जो तरल कोर की तुलना में अधिक गति से बहती है। यह घटना चित्र 10 (a) में स्पष्ट है, जहाँ दीवार के निकट स्थान 0.0056–0.0058 मीटर और 0.0076–0.0078 मीटर के बीच गति के स्पाइक्स देखे जाते हैं। नोजल केंद्र पर एक संबंधित गति की कमी होती है, जिसे तरल अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के प्रवाह के लिए जिम्मेदार ठहराया

जाता है। नोजल निर्गम पर, वाष्प अब मौजूद नहीं है, जिससे एक सामान्य गति प्रोफाइल बनती है, जैसा कि चित्र 10 (b) में दिखाया गया है।

निष्कर्ष

- CFD सिमुलेशन ने VOF मल्टीफेज मॉडल, $k-\omega$ SST टर्बुलेन्स मॉडल, और Zwart-Gerber-Belamri गुहिकायन मॉडल का उपयोग करते हुए गुहिकायन व्यवहार को प्रभावी ढंग से कैचर किया।
- तीन गुहिकायन चरण—आरंभ, विकास, और सुपर—गुहिकायन—पहचाने गए, जो प्रयोगात्मक के साथ मेल खाते हैं।
- अध्ययन में पाया गया कि बायोडीजल डीजल ईंधन के समान गुहिकायन व्यवहार प्रदर्शित करता है लेकिन समान गुहिकायन चरणों तक पहुँचने के लिए अधिक इन्जेक्शन दबाव की आवश्यकता होती है।
- ये निष्कर्ष गुहिकायन मॉडलिंग की सटीकता को बढ़ाने में योगदान करते हैं, जो डीजल और जैव-डीजल अनुप्रयोगों में ईंधन इन्जेक्शन को परमाणुकरण करने के लिए महत्वपूर्ण है।

आभार

यह शोध गुजरात विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी परिषद (GUJCOST)—गांधीनगर, भारत द्वारा अनुमोदित पत्र संख्या GUJCOST/STI/2023-24/352 दिनांक 25/04/2023 द्वारा समर्थित है।

शोध पत्र में प्रयुक्त अंग्रेजी शब्दों की समानार्थक हिन्दी शब्दावली

Alphabetically sorted terminology in English	वर्णमाला अनुक्रमित हिन्दी शब्दावली
Atomization	परमाणुकरण
Cavitation	गुहिकायन
Density	घनत्व
Geometry	ज्यामिति
Liquid	तरल
Pressure	दबाव
Vapor	वाष्प
Waste Cooking Oil based Biodiesel	अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल

संदर्भ

1. Brennen, C. E. (2013). Cavitation and bubble dynamics. Cambridge University Press.
2. Franc, J. P., & Michel, J. M. (2004). Fundamentals of cavitation. Kluwer Academic Publishers.
3. Kim, H. K., & Lee, C. J. (2008). Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics. International Journal of Heat and Fluid Flow, 29(4), 1001-1009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.03.014>
4. Knapp, R. T., Daily, J. W., & Hammitt, F. G. (1970). Cavitation. McGraw-Hill.
5. Leighton, T. G. (1994). The acoustic bubble. Academic Press.
6. Nurick, W. H. (1976). Orifice cavitation and its effect on spray mixing. Journal of Fluids Engineering, 98(4), 681-687. <https://doi.org/10.1115/1.3448452>

7. Payri, R., Salvador, F. J., Martí-Aldaraví, P., & Martínez-López, J. (2013). Using spray momentum flux measurements to understand the influence of cavitation and hydraulic flip on diesel injector flow characteristics. *Fuel*, 107, 803-812. 10.1016/J.FUEL.2004.10.009
8. Sou, A., Biçer, B., & Tomiyama, A. (2014). Numerical simulation of incipient cavitation flow in a nozzle of fuel injector. *Computers & Fluids*, 103, 42-48.
9. Zwart, P. J., Gerber, A. G., & Belamri, T. (2004, May). A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics. In *Fifth International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan (Vol. 152)*.
10. Baumgarten, C. (2006). *Mixture formation in internal combustion engines*. Springer Berlin Heidelberg.
11. Mohan, B., Yang, W., & Chou, S. (2014). Cavitation in injector nozzle holes - A parametric study. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(1), 70-81.
12. Bambhania, M. P., & Patel, N. K. (2022). Numerical modeling of the cavitation flow in throttle geometry. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(2), 257-267. <https://doi.org/10.47176/jafm.16.02.1348>
13. Bambhania, M. P., & Patel, N. K. (2023). Hydrodynamic cavitation in the fuel injector nozzle and its effect on spray characteristics: A review. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 10(1), 1-20.
14. Payri, R., Salvador, F. J., Gimeno, J., & Zapata, L. D. (2012). Diesel nozzle flow characteristics of biodiesel fuels. *Fuel*, 94, 443-452.