

Modelling dan Pembuatan Algoritma Aliran Fluida pada External Ballistics dengan Model G1-Standard-Bullet Menggunakan Metode Lattice Boltzmann

Kumara Ari Yuana¹

Program Studi Informatika Universitas Amikom Yogyakarta

kumara.a@amikom.ac.id

INTISARI

Komputasi dan eksperimental dalam dunia teknik permesinan (mechanical engineer) merupakan bidang yang saling melengkapi. Komputasi dilakukan untuk memberikan gambaran dan penjelasan rasional dari fenomena yang dihasilkan pada eksperimen. Komputasi juga memberikan prediksi sebelum dilakukan eksperimen untuk lebih mematangkan kondisi-kondisi dari sebuah eksperimen. Komputasi dengan metode Lattice Boltzmann adalah metode yang relatif baru dan menjanjikan di dunia komputasi aliran fluida atau CFD (Computational Fluid Dynamics), sebagai alternative metode yang sudah lama dikembangkan dari persamaan kontinum Navier-Stokes. Metode Lattice Boltzmann berangkat dari logika interaksi sekumpulan partikel dan ditelusuri pola interaksinya melalui bantuan pola jaringan (lattice). Pada riset ini akan digunakan metode Lattice Boltzmann untuk membuat model matematis dan algoritmanya pada aliran fluida yang mengalir di sekitar External Ballistics model G1-Standard-Bullet. Tahap riset selanjutnya adalah pengembangan pembuatan coding pemrograman dan simulasi visual untuk mengetahui pola aliran dan analisis-analisis aerodinamisnya.

ABSTRACT

Computational and experimental in the world of mechanical engineering is a complementary field and providing a picture and a rational explanation of the phenomena generated from the experiment. Computation with the Lattice Boltzmann method is a relatively new and promising method in the world of fluid flow computation or CFD (Computational Fluid Dynamics), as an alternative to the long-established method of the Navier-Stokes continuum equation. The Lattice Boltzmann method departs from the logic of the interaction of a set of particles and traces its interaction pattern through the aid of a network pattern (lattice). In this research we will use the Lattice Boltzmann method to create a mathematical model and algorithm for the flow of fluid flowing around External Ballistics model G1-Standard-Bullet. The next stage of research is developing the development of coding programming and visual simulation to know the flow pattern and aerodynamic analysis.

I. PENDAHULUAN

Persoalan External balistik adalah persoalan yang mempelajari jalannya peluru setelah keluar dari pelontar hingga mencapai sasaran (Heard, 2008). Secara eksperimental, persoalan eksternal balistik merupakan persoalan yang rumit dan mahal melibatkan banyak alat dan berbagai rujukan tabel matematis hasil berbagai eksperimen yang sudah pernah dilakukan. Dengan bantuan komputer dan metode komputasi, maka banyak simulasi yang dapat dilakukan sehingga menghemat banyak biaya. Karena

eksternal ballistics ini melalui media yang berbentuk fluida, maka pendekatan persoalannya adalah bidang mekanika fluida. Mekanika fluida sendiri dapat didekati dengan 3 cara (Anwer, 2016): pendekatan teoritis, eksperimental dan komputasional. Pendekatan teori memiliki kelebihan informasi yang umum dan rasional dalam bentuk rumus-rumus dasar, tetapi memiliki kelemahan terbatas pada geometri dan situasi fisis sederhana. Pendekatan eksperimental kelebihanannya memberikan data paling realistis dari situasi yang disusun pada sistem saat

eksperimen, tetapi memiliki kelemahan kebutuhan peralatan yang pengoprasiannya mahal untuk situasi mutakhir. Sedangkan pendekatan komputasional atau dikenal sebagai *Computational Fluid Dynamics* (CFD), memiliki kelebihan mampu menangani situasi fisis yang rumit dan detail, tetapi memiliki kelemahan terjadinya *truncation error* akibat komputasi dan persoalan *boundary conditions* yang tidak selalu sama persis seperti situasi eksperimental.

CFD adalah metodologi untuk memperoleh solusi secara diskret pada persoalan aliran fluida (Anwer, 2016). Solusi diskret adalah solusi yang diperoleh dari pendekatan diskretisasi ruang dan waktu dari situasi fisis yang sebenarnya kontinu. CFD dilaksanakan untuk mensimulasikan secara rinci sebuah fenomena untuk memprediksi parameter yang ingin diketahui sebelum dibangun prototype sebuah proyek atau eksperimen.

Massie, B(2016) melakukan simulasi eksternal ballistics model *G1-Standard-Bullet* untuk tembakan jarak jauh dengan melibatkan gravitasi bumi dengan pola trajektori. Secara dimensional, ukuran model *G1-Standard-Bullet* diukur rasio terhadap diameternya dengan sebutan kaliber. Panjang kaliber 3,28 artinya 3,28 kali diameternya. Kepala berbentuk ogive kaliber radius 2,00.

Langkah pertama untuk menyelesaikan persoalan rekayasa (*engineering*) adalah dengan pemodelan atau *modelling* (Kreyzig, 2011). *Modelling* berangkat dari sistem fenomena nyata untuk kemudian dituangkan dalam ekspresi persamaan matematis dalam bentuk fungsi yang menghubungkan antar variabel yang saling mempengaruhi. Dalam bidang rekayasa, persamaan matematis sangat banyak menghasilkan persamaan differensial. Langkah selanjutnya setelah *modelling* adalah mencari metode penyelesaian dari persoalan yang ditampilkan pada *modelling*. Sangat sedikit persoalan yang dihasilkan dari persoalan rekayasa mutakhir yang dapat diselesaikan dengan cara analitis, tetapi hanya dapat diselesaikan secara metode numeris. Langkah selanjutnya adalah penyusunan algoritma dan coding atau pemrograman.

Langkah setelah pemrograman adalah melakukan komputasi dan diakhiri dengan menginterpretasikan hasilnya.

Langkah-langkah dalam CFD adalah (Anwer, 2016):

1. Penentuan masalah nyata yang akan diselesaikan. Pada penelitian ini persoalan nyatanya adalah ingin diketahui aliran fluida yang melingkupi eksternal balistik model G1.
2. *Modelling* matematis berupa penterjemahan situasi dan kondisi yang terjadi pada masalah nyata ke dalam rumus-rumus matematika.
3. Diskretisasi persamaan matematika hasil pemodelan. Rumus-rumus matematika yang diperoleh pada *modelling* langkah 2 adalah fungsi relasi yang bersifat kontinu. Rumus-rumus yang berangkat dari persoalan nyata harus didiskretisasi agar dapat diselesaikan dengan komputer yang hanya mampu menghitung secara aljabar.
4. Algoritma perhitungan hasil diskretisasi persamaan aljabar. Pada tahap ini mulai diperlukan algoritma agar dapat dipahami logika langkah penyelesaiannya untuk kemudian dibuat program komputer (*coding*). Pada langkah ini sudah tersajikan persamaan hasil diskretisasi beserta syarat batas (*boundary conditions*) dan syarat awal (*initial conditions*) yang diperlukan untuk perhitungan.
5. Pemrograman, Eksekusi, Visualisasi dan Analisis. Pada langkah ini Algoritma yang dihasilkan pada langkah 4 kemudian diterjemahkan ke dalam bahasa pemrograman agar dapat dibaca oleh komputer untuk kemudian dieksekusi dan dipresentasikan hasilnya. Analisis hasil adalah langkah akhir dari sebuah penelitian CFD agar memberikan manfaat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Simulasi komputasi aliran fluida (*Computation Fluid Dynamics-CFD*) secara konvensional berangkat dari persamaan atur (*governing equation*) yaitu persamaan kontinyu dan *Navier-Stokes* (Sivagurudassprakash, 2011). Persamaan atur ini diselesaikan dengan cara mendiskretisasi

dahulu (terdapat 3 metoda: *Finite Difference*, *Finite Volume* atau *Finite Element*) secara spatial dan temporal. Terdapat dua kategori untuk menyelesaikan: *Front Capturing* dan *Front Tracking Method*. Dalam *Front Capturing Method*, aliran fluida dilacak terlebih dahulu dan kemudian baru *dicapture interface* antar 2 fasenya. Berdasarkan cara meng-*capture interface* antar 2 fasenya terdapat 3 metode: *Marker and Cell*, *Volume of Fluid* dan *Level Set*. Sementara dalam *Front Tracking Method*, lokasi interface langsung dilacak sehingga profil interface secara akurat dapat diperoleh. Ada 3 metode dalam front tracking ini: *The Boundary-Fitted Grid*, *Tryggvasson's Hybrid Method* dan *Boundary Element Method*.

Berbeda dengan CFD konvensional tersebut diatas, Metode Lattice Boltzmann (MLB) berangkat dari level *mesoscopic* (level ini terletak diantara level makroskopik dan mikroskopik) dengan cara menyelesaikan persamaan Boltzmann yang merupakan persamaan fungsi distribusi pergerakan sekumpulan partikel pada domain yang didiskretisasi menjadi jaring-jaring (*lattice*) (Sivagurudassprakash, 2011). Pada dasarnya LBM adalah berasal dari pengembangan *Lattice Gas Cellular Automata* (LGCA) untuk mengatasi persoalan-persoalan yang muncul akibat perhitungan statistik. Idennya adalah interaksi sekumpulan partikel secara mekanistik dibungkus dalam sebuah variabel yang disebut variabel fungsi distribusi yang dapat mengalir seperti fluida dengan cara seperti interaksi tumbukan bola bilyard. Pada MLB penyelesaian persamaan diatur secara numeris melalui dua tahap: tabrakan (*collision/relaxation*) dan aliran (*streaming/advection*).

Analisa pergerakan peluru dibagi menjadi 3 tahap [3]:

1. *Internal Ballistics*: membahas persoalan peristiwa yang terjadi saat letupan peluru terjadi hingga peluru keluar mulut senapan.
2. *External Ballistics*: membahas persoalan peristiwa pergerakan dari peluru meninggalkan mulut senapan hingga mencapai sasaran akhir.

3. *Terminal Ballistics*: membahas persoalan saat peluru mencapai sasaran berupa apa yang terjadi dengan pelurunya dan hasil akibat interaksi sasaran dengan peluru tersebut

Khusus untuk *External Ballistics*, pergerakan peluru ketika meninggalkan mulut senapan akan dipengaruhi oleh:

1. Pergerakan di udara vakum (*motion in vacuum*) dimana kondisi ini adalah kondisi teoritis dimana pergerakan peluru akan mengikuti hukum Newton pertama bahwa peluru akan bergerak mengikuti garis lurus jika tidak ada pengaruh gaya dari luar.
2. Sudut keberangkatan peluru (*angle of departure*) yang biasa diwakili oleh sudut mulut senapan
3. Gravitasi bumi dimana semua benda yang memiliki masa pasti akan ditarik ke arah pusat bumi.
4. Gaya gesek udara yang dapat dianggap selalu berlawanan dengan arah pergerakan peluru yang merupakan perhatian riset aerodinamis peluru.
5. Berat massa dan desain peluru dimana energy peluru bergerak adalah hasil perkalian massa peluru dengan kecepatan dan desain peluru akan sangat mempengaruhi gaya gesek udara.
6. Putaran peluru dimana peluru saat bergerak menembus udara ternyata mengalami putaran (*spin*)
7. Rotasi bumi, dimana rotasi bumi ini sangat besar pengaruhnya untuk peluru berjarak jauh seperti *missile*.

Pada penelitian ini hanya akan diteliti pengaruh desain *external ballistics* model *G1-Standard-Bullets* dengan diawali *modelling* dan pembuatan algoritma untuk dikembangkan ke arah *programming* visualisasi fluida yang tentu berakibat pada gaya gesek dan usulan perbaikan desain untuk memperbaiki efek *external ballistics*.

III. DASAR TEORI

Metode Lattice Boltzmann

Metode Lattice Boltzmann berdasarkan ide bahwa distribusi molekul dalam sistem fluida dinyatakan dalam persamaan [1]:

$$f(r+cdt, c+Fdt, t+dt)drdc - f(r,c,t)drdc = \Omega(f)drdc dt \quad (1)$$

dimana, $f(r,c,t)drdc$ adalah fungsi distribusi molekul pada posisi r dengan kecepatan c pada saat t , sebelum mengalami gaya luar sebesar F , dan setelah mengalami gaya luar F menjadi $f(r+cdt, c+Fdt, t+dt)drdc$ dan perubahan jumlah molekul sebelum dan sesudah tabrakan molekul sebesar $\Omega(f)drdc dt$. Jika persamaan (1) diatas dibagi dengan $drdc dt$ dan dengan $dt \rightarrow 0$, maka diperoleh:

$$\frac{df}{dt} = \Omega(f) \quad (2)$$

Persamaan (2) menunjukkan bahwa total perubahan kecepatan distribusi molekul sama dengan kecepatan perubahan tumbukan. Karena f adalah fungsi terhadap r , c dan t , maka:

$$df = \frac{\partial f}{\partial r} dr + \frac{\partial f}{\partial c} dc + \frac{\partial f}{\partial t} dt,$$

dan jika kedua sisi dibagi dt , menghasilkan

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial r} \frac{dr}{dt} + \frac{\partial f}{\partial c} \frac{dc}{dt} + \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial r} c + \frac{\partial f}{\partial c} a + \frac{\partial f}{\partial t},$$

dimana a adalah akselerasi dan $a=F/m$ (Hukum Newton kedua). Sehingga persamaan (2) diatas dapat ditulis sebagai:

$$\frac{df}{dt} + \frac{\partial f}{\partial r} c + \frac{\partial f}{\partial c} \frac{F}{m} = \Omega \quad (3)$$

Khusus untuk sistem yang tidak terkena gaya dari luar F , maka persamaan (3) dapat menjadi:

$$\frac{df}{dt} + c \nabla f = \Omega \quad (4)$$

dimana c dan ∇f berupa besaran vector. Operator Ω oleh Bhatnagar, Gross dan Krook didekati dengan [1]:

$$\Omega = \omega(f^{eq} - f) = \frac{1}{\tau} (f^{eq} - f) \quad (5)$$

Dengan $\omega = \frac{1}{\tau}$, dimana ω adalah koefisien frekwensi tabrakan molekul dan τ adalah faktor relaksasi.

Persamaan (4) diatas dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{df}{dt} + c \nabla f = \frac{1}{\tau} (f^{eq} - f) \quad (6)$$

Jika persamaan (6) diatas didiskretisasi dengan arah tertentu diperoleh:

$$\frac{df^i}{dt} + ci \nabla f^i = \frac{1}{\tau} (f_i^{eq} - f_i) \quad (7)$$

atau:

$$f_i(r+c_i \Delta t, t+\Delta t) = f_i(r, t) + \frac{\Delta t}{\tau} [f_i^{eq}(r, t) - f_i(r, t)] \quad (8)$$

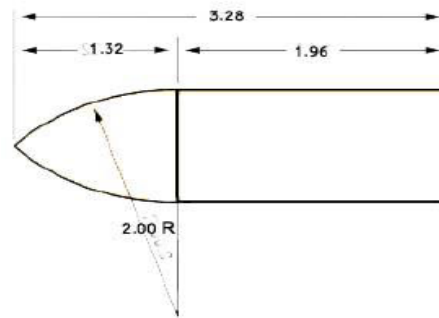
Parameter-parameter makroskopis berupa densitas dan kecepatan aliran fluida dinyatakan sebagai [1]:

$$\rho = \sum_i f_i^{eq} \quad (9)$$

$$\rho c = \sum_i c_i f_i^{eq} \quad (10)$$

IV. METODE PENELITIAN

Pada riset ini akan digunakan model pemampang *external ballistics* model *G1-Standard-Bullets* seperti pada gambar 3 dimana semua angka adalah rasio terhadap diameter, untuk dianalisis dalam lattice D2Q9



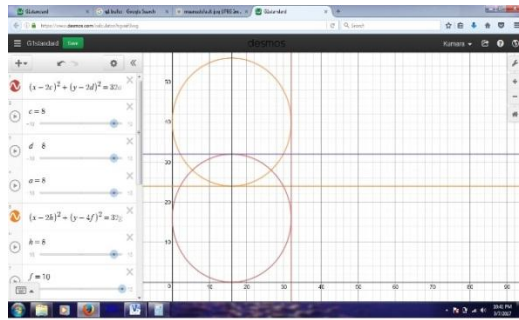
Gambar 1. *External ballistics* model *G1-Standard-Bullets*

Pada penelitian ini akan dibuat tahapan modelling CFD dengan MLB dengan pembuatan lattice D2Q9:

1. Aliran pada lattice tanpa kehadiran peluru. Disini akan dipastikan bahwa visual aliran sesuai dengan harapan bahwa aliran yang terjadi adalah laminar di sepanjang domain.
2. Aliran pada lattice diberi tambahan solid boundary ditengah domain berbentuk penampang bujur *external ballistics* model *G1-Standard-Bullets*.

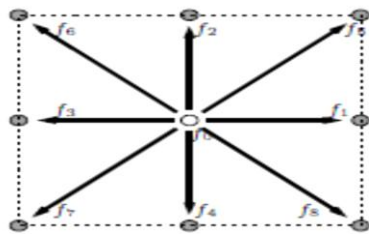
MODELLING SECARA MATEMATIKA

Berikut adalah skema pemodelan dengan menggunakan soft ware online [desmos.com/calculator](https://www.desmos.com/calculator), gambar 2. Solusi dalam MLB, sesuai namanya, direpresentasikan dalam domain jejaring yang pada titik potong jejaring tersebut terletak nilai distribusi partikel. Partikel-partikel inilah yang akan mengalir ke arah jalur jarring tertentu yang sudah disiapkan sesuai susunan awal.



Gambar 2. Skema pemodelan

Terminologi dalam MLB untuk menggambarkan dimensi jejaring dan jumlah macam kecepatan adalah $DnQm$, dimana n menggambarkan jumlah dimensi jejaring (yaitu 1 untuk 1 dimensi, 2 untuk 2 dimensi dan 3 untuk 3 dimensi) dan m menggambarkan macam jumlah kecepatan. Sebagai contoh D_2Q_9 berarti jumlah dimensi yang digunakan adalah 2 dimensi dan 9 jenis kecepatan, seperti pada gambar 3.

Gambar 3. D_2Q_9

Pada model D_2Q_9 yang dimaksud 9 jenis kecepatan adalah f_0 yang digambarkan $c(0,0)$, f_1 yang digambarkan $c(1,0)$, f_2 yang digambarkan $c(0,1)$, f_3 yang digambarkan $c(-1,0)$, f_4 yang digambarkan $c(0,-1)$, f_5 yang digambarkan $c(1,1)$, f_6 yang digambarkan $c(-1,1)$, f_7 yang digambarkan $c(-1,-1)$, f_8 yang digambarkan $c(1,-1)$. Nilai faktor pembobot untuk $f_0 = 4/9$, $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = 1/9$, $f_5 = f_6 = f_7 = f_8 = 1/36$.

Syarat Batas (Boundary condition)

Boundary condition atau syarat batas merupakan hal yang penting dalam sebuah simulasi, batasan ini juga akan mempengaruhi hasil dari simulasi. Beberapa model persamaan syarat batas adalah: *in-out flow*, *slip boundary* dan *non-slip boundary*. *Non-slip boundary condition* merupakan implementasi *boundary* yang membuat partikel memantul (*bounce back*), di tulis dengan persamaan (8), *slip boundary* akan membuat partikel melaju secara *periodic* dan

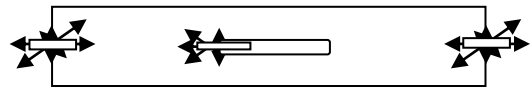
berkala dengan persamaan (9) dan terakhir adalah mengabaikan setiap partikel yang melewatinya (*in-out flow*), (10).

$$f_{-i}(x, t + 1) = f_i(x, t) \quad (8)$$

$$f_i(i, j, 0) = f_i(i, j, N_2 - 1) \quad (9)$$

$$f_i(i, j, N_2 - 1) = f_i(i, j, N_2) \quad (10)$$

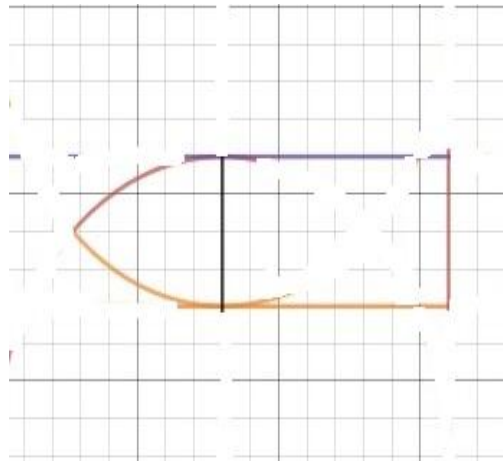
pada simulasi penelitian batas tepi pada simulasi menggunakan *outflow* dimana partikel akan di abaikan pergerakannya, atau di anggap hilang setelah mencapai batas, pada gambar 2 benda peneltian berlaku *bounceback* dimana aliran partikelnya memantul jika bertabrakan dengan benda, rancangan boudary seperti terlihat di gambar 4.



Gambar 4. Boundary Conditions

Algoritma

Berdasarkan skema yang terlihat pada gambar 4, maka bentuk irisan external balistik di dalam lattice adalah seperti pada gambar 5:



Gambar 5. Skema Domain External Ballistic

Algoritma secara pseudo-code:

1. Deklarasi parameter: Domain yang ditempati fluida dan solid,
 - a. Obstacles $[i,j]=0$ if domain fluid
 - b. Obstacle $[i,j]=1$ if domain solid (ditempati external ballistic)
2. Syarat batas:
 - a. Kecepatan fluida di sisi atas, bawah, kanan dan kiri bernilai $u[i,j]=1$ dan $v[i,j]=0$

- b. Kecepatan fluida diseluruh permukaan eksternal ballistics $u[i,j]=0$ dan $v[i,j]=0$
3. Syarat awal:
 - a. Kecepatan fluida di sisi atas, bawah, kanan dan kiri bernilai $u[i,j]=1$ dan $v[i,j]=0$
 - b. Kecepatan fluida diseluruh permukaan eksternal ballistics $u[i,j]=0$ dan $v[i,j]=0$
4. Perhitungan Fungsi distribusi akibat Collisions
 - a.
$$f_i(\mathbf{x}+\mathbf{e}_i\Delta t, t+\Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau}(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) + S_i(\mathbf{x}, t)$$
 - b. $f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)$ dihitung berdasar persamaan kesetimbangan aliran
5. Perhitungan Fungsi distribusi akibat Streaming

$$f_i(\mathbf{x}+\mathbf{e}_i\Delta t, t+\Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t)$$
6. Perhitungan densitas

$$\rho = \sum_i f_i$$
7. Perhitungan kecepatan

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \sum_i f_i \mathbf{e}_i$$
8. Plotting

V. KESIMPULAN

1. Metode LBM sangat menjanjikan untuk pembanding dan pelengkap dan bahkan dapat menjadi pengganti metode CFD konvensional.
2. Metode LBM memiliki berbagai keunggulan dibanding metode CFD konvensional dalam bidang mampu menangani berbagai bentuk geometri aliran yang rumit.
3. Pendekatan Metode LBM yang bersifat fundamental berupa interaksi antar sekelompok partikel fluida lebih memberikan pemahaman natural dibanding CFD konvensional.
4. Eksternal Ballistics yang dilingkupi aliran fluida dalam riset ini dapat diperlakukan sebagai Boundary Conditions yang diam diantara aliran fluida, walaupun secara eksperimental adalah sebaliknya dimana ballistics yang bergerak ditengah fluida statis.

REFERENSI

- [1] Kreyzig, E., Advanced Engineering Mathematics, 10th edition, 2011, John Wiley and Sons.
- [2] Heard, Brian J, Handbook of Firearms and Ballistics, 2nd edition, 2008, John Wiley and Sons.
- [3] Mohammad, AA, 2011, Lattice Boltzmann Method, Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes, Springer-Verlag London.
- [4] Anwer, Syed Fahad, Introduction to Computational Fluid Dynamics, 2016, Aligarh Muslim University.
- [5] Sivagurudassprakash, Ganesh C.A, Immiscible Two Phase Flows Using Lattice Boltzmann Method, 2011, Civil and Computational Engineering Centre, Swansea University, UK
- [6] Mele, Igor, 2013, Seminar on Lattice Boltzmann Method, University of Ljubljana, Slovenia.
- [7] Massie, B., 2016, External Ballistics of Long Distance Shooting, Flathead Community College
- [8] Chief of the Defense Staff, 1992, Ballistics and Ammunition, Vol 6, Canada
- [9] Yu, Wei, 2010, Aerodynamic Analysis of Projectile in Gun System Firing Process, Journal of Applied Mechanics, Vol 77
- [10] Chen, Michael M, 2011, Analytical Approach to Ballistic Dispersion of Projectile Weapons Based on Variant Launch Velocity, Journal of Applied Mechanics, Vol 78
- [11] Li, Baoming, 2003, Lattice Boltzmann Model of Microfluidics with High Reynolds Number in the Presence of External Forces, American Chemical Society
- [12] Nils Thürey, Ulrich Rude, (2004) "Free Surface Lattice-Boltzmann fluid simulations with and without level sets" journal, vision