

REVIEW REKAYASA OLAHRAGA BALAP SEPEDA (*CYCLING SPORT ENGINEERING*) SEBAGAI REKOMENDASI PENINGKATAN PERFORMA ATLET LOKAL DAN NASIONAL

Gatut Rubiono¹⁾, Nurida Finahari²⁾, Toni Dwi Putra²⁾

¹⁾ *Teknik Mesin, Universitas PGRI Banyuwangi, Jl. Ikan Tongkol 01 Banyuwangi 68416*

²⁾ *Teknik Mesin, Universitas Widyagama Malang, Jl. Taman Borobudur Indah 3 Malang*

Email: g.rubiono@unibabwi.ac.id

Abstrak – Atlet balap sepeda Indonesia masih mengalami ketertinggalan dalam lomba-lomba tahunan yang bertaraf internasional. Aspek rekayasa olahraga (*sport engineering*) dapat digunakan sebagai pendukung dalam upaya memperbaiki performa atlet. Rekayasa olahraga merupakan kombinasi ilmu olah raga dan ilmu rekayasa teknik. Artikel ini merupakan review hasil-hasil penelitian di olahraga balap sepeda dari aspek rekayasa olahraga untuk mendeskripsikan perkembangan dan tren penelitian. Review dilakukan dengan mengkaji literatur berbasis publikasi ilmiah di internet. Hasil kajian menunjukkan bahwa balap sepeda telah dikaji dari berbagai aspek yaitu komponen sepeda, teknik bersepeda, aspek pakaian, helm, aspek aerodinamika dan kombinasi aspek-aspek tersebut. Aspek aerodinamika merupakan topik yang banyak dikaji karena hambatan angin merupakan faktor utama dalam balap sepeda. Aerodinamika diteliti dengan metode simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan eksperimen di terowongan angin dengan model skala atau skala penuh. Aspek kedua adalah aspek biomekanika khususnya yang berkaitan dengan posisi duduk dan kayuhan pedal.

Kata kunci: rekayasa olahraga, balap sepeda, gaya hambat, aerodinamika

Abstract – Indonesian cycling athletes are still lagging behind in annual international competitions. Sports engineering aspects can be used as an endorser in an effort to improve athletes performance. Sports engineering is a combination between sports science and engineering. This article is a review of the results of research in cycling from the aspect of sports engineering to describe the development and trends of research. The review is carried out by reviewing literatures on scientific publications on the internet. The results of the study show that bicycle racing has been studied from aspects of bicycle components, cycling techniques, clothing, helmets, aerodynamic aspects and a combination of these aspects. The aspect of aerodynamics is a topic that is widely studied because wind resistance is a major factor in bicycle racing. Aerodynamics was examined by simulation methods using *Computational Fluid Dynamics* (CFD) and experiments in wind tunnels with less or full scale models. The second aspect is the biomechanical aspect specifically related to sitting position and pedaling.

Keywords: sport engineering, cycling, drag force, aerodynamics

PENDAHULUAN

Federasi olahraga sepeda dunia (*Union Cycliste Internationale/UCI*) mengapresiasi International Tour de Banyuwangi Ijen (ITdBI), dimana rutenya dinilai indah dan menantang (Fanani, 2018). Balap sepeda bertaraf internasional ini memiliki empat etape sepanjang 599 km. Etape pertama adalah rute menanjak kategori dua sepanjang lebih dari 10 km. Etape kedua adalah rute datar yang relatif panjang. Etape ketiga adalah lintasan tanjakan dan *rolling*. (Fanani, 2018b). Etape empat adalah rute menuju gunung Ijen. Tanjakan lebih dari 12 kilometer dengan gradien di atas 20% dan termasuk dalam *hors categorie* yaitu kategori paling berat dalam standar dunia. Jalur ini menjadi salah satu jalur

tanjakan paling ekstrem di Asia (Priyasidarta, 2018). Rute ini menjadikan ITdBI kompetisi balap sepeda kategori 2.2 (Fanani, 2018b).

Informasi Pengurus Besar Ikatan Sport Sepeda Indonesia (PB ISSI) tahun 2014 dalam referensi (Yunus & Saputra, 2017) menyebutkan bahwa terjadi ketertinggalan prestasi pembalap Indonesia dalam lomba-lomba balap sepeda kalender tahunan PB ISSI. Lomba-lomba ini adalah *Tour de Singkarak*, *Tour de East Java*, *Tour de Ijen Banyuwangi*, *Tour de Siak* dan *Tour de Indonesia*. Hampir di semua *event* tersebut yang mendapatkan juara atau pemenang perorangan maupun beregu diraih pembalap dari manca negara seperti Iran, Australia, dan pembalap Eropa seperti Belanda, Inggris, Rusia, Polandia.

Referensi (Yunus & Saputra, 2017) untuk melakukan penelitian komparasi rasio roda gigi dengan tanjakan 5% terhadap kecepatan maksimal pembalap pemula. Hasil penelitian memberikan rekomendasi penggunaan rasio roda gigi 53x 17 dibandingkan rasio 53x19 dan 53x21.

Aspek teknik merupakan salah satu faktor pendukung di bidang olahraga. Rekayasa olahraga (*sport engineering*) dapat dianggap sebagai disiplin ilmu rekayasa teknik baru. Bidang ilmu ini menjembatani kesenjangan antara dua bidang yang berbeda yaitu sains dan teknik olahraga. Para *engineer* olahraga bertanggung jawab dalam merancang dan membangun peralatan baru berdasarkan kebutuhan atlet, selain mengukur performa atlet, peralatan itu sendiri, serta interaksi keduanya. Rekayasa olahraga dapat didefinisikan sebagai aplikasi teknis matematika dan fisika untuk memecahkan masalah olahraga melalui desain, pengembangan, dan penelitian yang menghasilkan perangkat yang digunakan oleh atlet untuk meningkatkan performa mereka. Sebaliknya, ilmu olahraga (*sport science*) didefinisikan sebagai analisis dalam hal gerak, fisiologi, biomekanik dan psikologi seorang atlet (Taha et al., 2013).



Gambar 1. Hubungan antara *sport science* dan *sport engineering* (Haake, 1999 dalam Taha et al., 2013)

Tiga tujuan ilmu olahraga adalah untuk mengidentifikasi berbagai faktor manusia dan lingkungan yang mempengaruhi performa, untuk menganalisis efek yang mempengaruhi performa dan untuk mengoptimalkan performa (Emanuele & Denoth, 2012). Di masa depan, penelitian sains olahraga bersepeda akan terus sangat dipengaruhi dan didorong oleh perkembangan teknologi yang dirancang untuk menguji aspek fisiologi (fenomena molekuler dan seluler) dari pengendara dan desain mekanika sepeda (Faria et al., 2005). Performa bersepeda dipengaruhi faktor fisiologi, biomekanika, teknologi (Faria et al., 2005b), mekanika dan lingkungannya (Emanuele & Denoth, 2012). Pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme-mekanisme dan interaksinya yang mendasari gagasan optimalisasi dalam aspek dinamika olahraga bersepeda akan memungkinkan pendekatan yang lebih ilmiah untuk pengujian, pelatihan, dan penelitian (Faria et al., 2005b).

Aspek teknologi dapat menjadi penyebab ketertinggalan prestasi pembalap sepeda Indonesia. Penelitian bersepeda di masa depan harus terus sangat dipengaruhi oleh teknologi yang muncul. Ada banyak tantangan yang dihadapi para ilmuwan bersepeda yang harus

memanfaatkan teknologi baru dan mengambil sikap agresif dalam membawa informasi baru ke olahraga bersepeda (Faria et al., 2005b). Olahraga balap sepeda jalan terus-menerus mendorong batas-batas pengetahuan baru dan mempelajari setiap metode yang mungkin untuk meningkatkan kecepatan dan efisiensi (Abdullah et al., 2017). Kemajuan dalam peralatan bersepeda dapat memiliki implikasi besar bagi keseluruhan performa bersepeda. Misalnya, perkembangan sepeda kecepatan tunggal dan ganda menjadi sepeda multi gir (*multigeared bicycle*) telah memungkinkan kecepatan yang lebih besar dan kemampuan melintasi medan yang dulunya tidak bisa dilewati (Peiffer & Abbiss, 2010).

Performa dapat ditingkatkan dengan perbaikan aspek manusia dan perangkatnya yaitu, dengan meningkatkan penilaian, keterampilan, gaya pelatihan atau dengan inovasi dalam peralatan meliputi aspek aerodinamika, helm, sepeda ringan, pakaian, aerobar dan lain-lain (Ashe et al., 2003). Sepanjang sejarah bersepeda, ada peningkatan yang konstan pada faktor teknologi. Kekuatan pendorong di balik perbaikan ini bersepeda sebagian besar adalah kompetisi. Sebagian besar perbaikan selama bertahun-tahun telah memodifikasi tata letak mekanisme pada sepeda seperti bentuk sepeda, desain penggerak dan rekayasa material (McWilliams, 2013).

Hasil-hasil penelitian dapat diaplikasikan untuk peningkatan performa balap sepeda. Hasil-hasil penelitian memberikan informasi yang berguna bagi atlet, pelatih, dan ilmuwan olahraga dalam hal rekomendasi pelatihan, protokol latihan dan penyusunan desain penelitian (Faria et al., 2005). Artikel ini bertujuan untuk melakukan review rekayasa olahraga balap sepeda sebagai rekomendasi peningkatan performa atlet lokal dan nasional.

METODOLOGI

Review dilakukan dengan kajian literatur publikasi ilmiah di bidang rekayasa olahraga balap sepeda. Literatur didapatkan dari publikasi hasil penelitian berbasis internet. Uraian penelitian ditampilkan dalam bentuk deskripsi ringkas menjadi uraian perkembangan dan tren penelitian dari tahun ke tahun. Deskripsi secara sistematis dilakukan dalam bentuk kategori sesuai dengan topik penelitian. Deskripsi ini akan menunjukkan perkembangan tren penelitian rekayasa olahraga di balap sepeda.

PEMBAHASAN

Komponen Sepeda

Sebuah penelitian dilakukan untuk sistem kayuhan pedal baru yang membuat masing-masing pedal independen dari yang lain sehingga engkol tidak lagi tetap (*fix*) pada posisi 180°.

Sistem ini diaplikasikan untuk peningkatan performa bersepeda yang membutuhkan ketahanan. Delapan subyek non pembalap melakukan dua tes sepeda ergometer pada hari yang terpisah, satu dengan sistem pedal konvensional (CON) dan yang lain dengan sistem rotor (ROT). Mulai dari 75 W, output daya meningkat sebesar 25 W dengan interval 3 menit hingga subyek kelelahan. Meskipun penelitian lebih lanjut diperlukan, terutama untuk pembalap terlatih, sistem rotor dapat meningkatkan efisiensi delta selama bersepeda. Penentu kinerja lainnya (VO_2 max, output daya maksimal) tampaknya tidak berubah dibandingkan dengan sistem konvensional (Santalla et al., 2002).

Penggunaan roda gigi depan berbentuk ellips (*ellips chainring* juga disebut *chainwheels* atau *sprocket*) telah diminati komunitas amatir dan profesional. Sebuah studi dilakukan untuk menguji pengaruh penggunaan roda gigi ellips pada aspek fisiologis dan parameter kinerja selama uji coba bersepeda 10 km. Sembilan pesepeda pria menyelesaikan tiga uji coba menggunakan roda gigi standar atau ellips di dua pengaturan yang berbeda. Pesepeda dikondisikan tidak mengetahui jenis cincin rantai yang digunakan. Selama uji coba, output daya dan detak jantung dicatat pada frekuensi 1 Hz dan RPE (*ratings of perceived exertion*) diukur pada 3, 6 dan 8,5 km. Cincin rantai ellips tampaknya tidak memberikan manfaat dari segi performa dibandingkan rantai melingkar selama uji coba jarak menengah (Peiffer & Abbiss, 2010).

Sebuah simulasi dilakukan untuk pengembangan rangka sepeda. Simulasi dilakukan dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil simulasi diuji dalam bentuk eksperimen di terowongan angin (*wind tunnel*). Model yang dikembangkan adalah Trek KVF. Model ini dibandingkan dengan aerofoil standar NACA 0018. Hasil penelitian secara umum menunjukkan model KVF lebih aerodinamis dibandingkan aerofoil standar. Model Trek telah menciptakan rangka sepeda yang bisa memberi pengendara keuntungan besar yang kompetitif atas lawan mereka (McWilliams, 2013).

Sebuah penelitian bertujuan untuk menilai kemampuan simulasi CFD RANS dalam memprediksi kinerja aerodinamis lima jenis roda sepeda balap modern. Gaya hambat (*drag force*) dan gaya samping (*side force*) diselesaikan pada rentang sudut guling (*yaw*) yang berbeda. Model dibuat dengan menggunakan roda saja, tanpa garpu atau dukungan rangka apa pun. Simulasi berjalan pada model tunak (*steady state*) menggunakan densitas udara konstan (karena kecepatan rendah). Kecepatan angin yang digunakan adalah 8,94 m/dt yang sesuai dengan kecepatan putar roda (Pogni & Petrone, 2016).

Hasil awal yang diperoleh dengan metode ini menunjukkan kemampuan yang memuaskan untuk menggambarkan aerodinamika kualitatif perilaku roda sepeda balap, validasi lengkap hasil numerik hanya akan mungkin setelah pengujian terowongan angin. Karena fleksibilitas metodologi ini, sekarang memungkinkan untuk menggunakan CFD untuk memberikan lebih banyak jawaban pada beberapa pertanyaan dalam bersepeda kompetitif. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan, selain validasi terowongan angin, termasuk pengujian tidak stabil pada sudut sekitar 10° yang mengklarifikasi perilaku roda pada sudut kritis dan gaya hambat angin rata-rata (Pogni & Petron, 2016).

Berat dan kekakuan pedal adalah karakteristik penting. Lengan pedal yang lebih kaku akan menyebabkan lebih banyak kekuatan pedal ditransfer ke roda belakang sepeda daripada merubah lengan. Penurunan berat pedal membantu pengendara sepeda dan pembalap untuk melaju lebih cepat. Pedal dikaji sebagai perbandingan tegangan dan penghematan berat bahan alternatif dengan bahan baja yang ada. Meningkatkan kekuatan sementara mengurangi atau mempertahankan berat produk menjadi masalah penelitian yang sangat penting. Studi desain dilakukan dengan membandingkan desain alternatif pedal untuk pengurangan berat yang efektif. Material dipilih untuk meningkatkan rasio kekuatan terhadap berat. Penurunan berat dengan paduan aluminium 90 gram akan membuat desain menjadi menarik. Mengganti secara langsung Beralcast 310 meningkatkan kekakuan bagian sekitar 67% dan menurunkan beratnya sebesar 26,6% (Vairakanna & Chandran, 2017).

Teknik Bersepeda

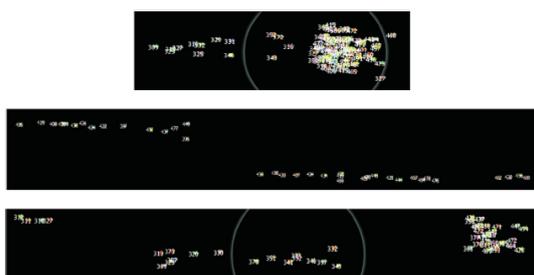
Efek posisi tubuh untuk berbagai durasi dan intensitas bersepeda dikaji terhadap dua belas pria sehat, aktif secara fisik tetapi tidak terlatih dan direkrut dari sebuah perguruan tinggi. Kriteria usia 17–25 tahun dan bukan perokok. Pesepeda rekreasi atau kompetitif dikeluarkan dari penelitian. Kondisi kardiovaskular atau pernapasan, perokok, dan yang lainnya diamati dengan aktivitas aerobar. Dua peserta dikeluarkan karena ketidakmampuan untuk menyelesaikan protokol latihan. Penelitian dilakukan dengan metode pengukuran respon kardiorespirasi (Ashe et al., 2003).

Peserta secara signifikan memiliki tingkat yang lebih besar untuk pengambilan oksigen (VO_2), ventilasi, denyut jantung, dan beban kerja maksimum pada posisi tegak. Selama bersepeda dalam kondisi stabil di tiga beban kerja, VO_2 (ml/kg/menit) dan efisiensi mekanis kotor secara signifikan lebih besar pada posisi tegak. Pada subyek yang tidak terlatih dan melakukan dengan upaya maksimal, posisi tegak memungkinkan

lebih besar VO_2 , ventilasi, detak jantung, dan beban kerja maksimal. Selanjutnya, dalam kondisi stabil atau mantap, olahraga bersepeda mungkin lebih mudah dalam posisi tegak. Pengendara sepeda yang tidak terlatih perlu mempertimbangkan pengaruh posisi tubuh efek terhadap keuntungan aerodinamis yang dikenal sebagai posisi aero (Ashe et al., 2003).

Peloton adalah kelompok pengendara sepeda yang secara bersama-sama mendapatkan manfaat pengurangan output daya (penghematan energi) dari *drafting*. Pemodelan komputer dilakukan untuk dinamika peloton dengan parameter perlambatan dimana besarnya deselerasi bervariasi sebagai fungsi kekuatan pengendara. Model divalidasi dengan menerapkan data kecepatan start massal yang terdiri dari 14 pengendara dan menjalankan uji coba simulasi yang menghasilkan profil posisi sesuai kondisi sebenarnya. Serangkaian eksperimen simulasi dijalankan dengan variasi jumlah pengendara, durasi satu peristiwa keluaran mendekati ambang batas dan variasi elevasi (Trenchard et al., 2015).

Pemodelan ini cukup akurat dalam hal parameter perlambatan dan osilasi yang dihasilkan antara peregangan (penurunan kepadatan kelompok). Hasil simulasi secara konsisten menunjukkan pemisahan atau penyortiran peloton ke dalam kelompok yang lebih kecil dengan kebugaran rata-rata yang sesuai dengan posisi kelompok relatif, yaitu kelompok bugar lebih dekat dengan bagian depan. Penyortiran peloton ke dalam kelompok yang berhubungan dengan kebugaran memberikan wawasan tentang mekanisme divisi kelompok serupa dalam kondisi kolektif biologis di mana anggotanya menunjukkan kapasitas kebugaran fisiologis yang heterogen (Trenchard et al., 2015).



Gambar 1. Hasil simulasi (Trenchard et al., 2015)

Gambar 1 menunjukkan tiga keadaan akhir dari simulasi dinamika peloton sepeda. Gambar 1 atas menunjukkan 100 pesepeda dalam simulasi dengan medan datar, peregangan peloton rendah dan pembelahan kelompok rendah diamati. Gambar 1 tengah menunjukkan segmen 100 pengendara sepeda yang melintasi ‘medan bukit 3% dan pembagian peloton tinggi menjadi tiga kelompok utama. Gambar 1 bawah menunjukkan 50 pesepeda dengan ‘satu kemiringan bukit 4%.

Peregangan dan pembelahan peloton diamati yaitu satu kelompok kepadatan tinggi terlihat di bagian depan (paling kanan) ketika kelompok peregangan mengikuti di belakang (Emanuele& Denoth, 2012).

Sebuah penelitian dilakukan untuk mengevaluasi metode yang setara untuk mengukur power output maksimal (P_{max}) dan ritme kayuhan optimal (C_{opt}) untuk bersepeda ketahanan. Penelitian dilakukan dengan menggunakan teori dan pendekatan eksperimental. Hubungan power-ritme disimulasikan dengan model teoritis juga dilengkapi dengan regresi kuadratik dan bias estimasi P_{max} dan C_{opt} dapat diabaikan (1,0 W dan 0,6 rpm). Di bagian eksperimen, delapan pengendara sepeda melakukan tes tambahan bersepeda pada 70, 80, 90, 100, dan 110 rpm untuk menghasilkan hubungan power-ritme pada konsentrasi laktat darah tetap dari 3, 3.5, dan 4 mmol L^{-1} . Hasil teoretis dan eksperimental menunjukkan bahwa P_{max} , C_{opt} , dan hubungan power-ritme seputar C_{opt} dapat diperkirakan dengan baik metode yang diusulkan (Emanuele& Denoth, 2012).

Aspek Pakaian

Eksperimen di angin terowongan angin dengan model pembalap sepeda dengan sampel pakaian yang dijahit dengan satu atau lebih dari 200 kain yang elastis (*stretch*). Pengukuran dimensi model dan area frontal memberikan koefisien drag nondimensional (C_d) dan angka Reynolds (Re) yang merepresentasikan kemampuan berbagai kain dan pakaian untuk mengurangi gesekan gaya hambat dan menginduksi krisis *drag* atau transisi aliran prematur. Krisis *drag* merupakan kecepatan udara kritis di atas segmen tubuh di mana aliran udara pada kondisi transisi dari laminar ke turbulen, menghasilkan bangun lebih kecil di belakang segmen tubuh dan penurunan yang sesuai dalam gaya drag (F_d) (Brownlie et al., 2009).

Sejumlah bahan kain memicu krisis drag pada bagian silinder dan ekstremitas badan, mengurangi C_d lebih dari 40%. Beberapa metode menurunkan F_d terbukti efektif, termasuk pakaian khusus, pelurusan jahitan dengan aliran udara, dan kain yang sesuai dengan tekstur tubuh. Pengukuran i pada pakaian yang sama memberikan rata-rata hambatan sekitar 3200 g dengan kesalahan standar ± 29 g. Model matematis pengurangan gaya hambat karena pakaian ini memberikan pengurangan waktu tempuh (Brownlie et al., 2009).

Penggunaan sepeda secara intensif dapat meningkatkan risiko disfungsi ereksi dan kompresi daerah perineum menunjukkan adanya mekanisme utama yang mengarah ke perubahan kualitas hidup seksual. Sembilan atlet

mengendarai 20 menit dengan simulator drum dengan kecepatan konstan dan rasio roda gigi memakai celana pendek dengan 3 bantalan bersepeda dengan desain dan ketebalan berbeda yaitu *basic* (BAS), *intermediate* (INT), dan *endurance* (END). Kinematika dan data tekanan dicatat pada menit ke 5, 15, dan 20 dengan sistem penangkapan gerak dan sensor tekanan (Marcolin et al., 2015).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa gaya vertikal dan nilai rata-rata tekanan pada sadel menurun secara signifikan selama periode 20 menit pengujian untuk BAS dan END. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan puncak pada yang sesuai area pengendara sepeda perineal meningkat secara signifikan hanya untuk BAS. Menariknya, indeks kenyamanan obyektif yang diukur tidak sesuai dengan evaluasi kenyamanan subyektif pengendara (Marcolin et al., 2015).

Helm Sepeda

Helm aero telah digunakan sejak 1980 untuk mengurangi resistensi aerodinamis. Desain dilakukan untuk meningkatkan efisiensi aerodinamis helm sepeda balap. Beberapa produsen helm telah memperkenalkan lesung pipi pada bagian luar helm yang meniru efek lesung 'bola golf' dengan maksud untuk mengurangi hambatan aerodinamis helm. Penelitian dilakukan untuk uji aerodinamika empat aero-helm. Eksperimen dilakukan di terowongan angin. Data hasil eksperimen menunjukkan tidak ada keuntungan yang terukur antara helm halus dan berlesung terhadap variasi sudut *pitch* dan pada sudut *yaw* nol (Alam et al., 2014).

Penelitian juga dilakukan untuk perbandingan antara helm jalan standar dan helm jenis *air attack*. Pengujian dilakukan dalam beberapa kecepatan terowongan angin konstan yang paling merepresentasikan kecepatan angin nyata yang akan dialami pengendara. Eksperimen dilakukan untuk mengumpulkan data dengan 7 kecepatan yang berbeda dari 3 m/dt hingga 15 m/dt. Satu set data direkam untuk setiap helm pada dua sudut *pitch* yang berbeda yaitu 0° dan 25° . Hasil pengujian menunjukkan bahwa helm aerodinamis memberikan pengurangan hambatan pada helm standar. Mengenakan helm *air attack* dalam posisi aero memungkinkan pengendara sepeda melaju dengan kecepatan lebih tinggi tanpa peningkatan pengeluaran energi (Abdullah et al., 2017).

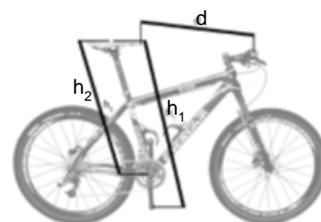
Sebuah studi aerodinamis lain dilakukan pada sebelas helm aero-road kelas atas dengan tujuan untuk menentukan apakah helm dapat secara bersamaan memiliki gaya hambat rendah dan pendinginan yang efisien. Manekin bersepeda dibuat khusus dengan kecepatan 40 km/jam dengan rentang sudut *yaw* 0° hingga $\pm 25^\circ$ dan pada kecepatan 50 dan 58 km/jam pada *yaw* 0° . Pengujian termal kemampuan pendinginan setiap

helm dilakukan dengan pemanas yang dibuat khusus sesuai bentuk kepala manekin, yang menggabungkan 36 termokopel yang tertanam di permukaannya. Kontur plot distribusi suhu di atas kepala dibuat bersama dengan gambar yang diperoleh oleh kamera termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua helm aero-road umumnya sama dinginnya tetapi mungkin ada perbedaan yang signifikan dalam hambatan aerodinamik (Fitzgerald et al., 2018).

Simulasi numerik digunakan untuk menyelidiki besarnya gaya hambat yang terjadi di sekitar permukaan helm. Dengan perangkat lunak CFD, empat variasi sudut datang angin (*angle of attack*) 0° , 10° , 20° dan 30° serta variasi angka Reynold 7.14×10^4 , $1,00 \times 10^5$, dan $1,16 \times 10^5$ disimulasikan untuk menentukan karakteristik aliran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa besar area pusaran (*vortex*) terbentuk di bagian bawah kurva helm dan mendominasi pada sudut datang 30° . Koefisien hambat yang dihasilkan pada sudut datang 0° hingga 20° cenderung menurun tetapi pada 20° dan 30° koefisien hambat meningkat (Syamsuri et al., 2018).

Aspek Biomekanika

Meskipun bersepeda adalah gerakan kaki dalam lintasan melingkar tertentu, hal ini bukanlah gerakan sederhana karena dapat dipengaruhi oleh geometri terkecil, faktor geografi dan perubahan berbagai faktor lain yang dapat berdampak pada parameter biomekanik. Pengetahuan tentang beberapa faktor ini dapat digunakan untuk membantu dalam menetapkan dan mencapai tujuan rehabilitasi atau balap. Mayoritas penelitian yang mencakup modifikasi kondisi bersepeda dilakukan untuk menjelaskan pola perilaku pengendara sepeda dan hanya sedikit penelitian yang menghasilkan hasil yang praktis. Karena itu, diperlukan penelitian tambahan untuk menemukan cara bersepeda yang lebih aman dan efisien (Fonda & Sarabon, 2010).



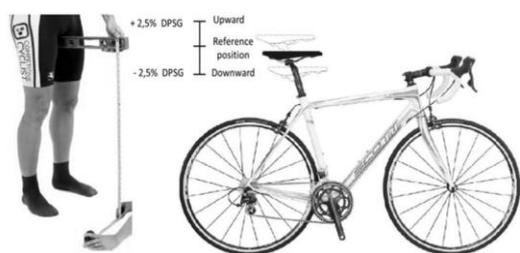
Gambar 2. Skema geometri sepeda (h_1 : tinggi sadel dalam ilmu olahraga, h_2 : tinggi sadel yang digunakan oleh pembalap dan praktisi, d : jarak antara sadel dan pegangan kemudi) (Fonda & Sarabon, 2010)

Pembalap sepeda menggunakan energinya untuk mengayuh sepeda ke arah depan. Energi ini mayoritas digunakan untuk mengatasi hambatan angin dan faktor-faktor gesekan pada mekanisme

sepeda. Proses pembangkitan energi dalam bentuk potensial dan kinetik ini melibatkan kinerja otot. Kemampuan seorang pengendara sepeda untuk memaksimalkan output daya dan mengoptimalkan aktivitas ototnya akan meningkatkan kinerja. Sebuah hasil penelitian menunjukkan bahwa otot ekstensor pinggul dan otot fleksor lutut memiliki respons unik antara overhead submaksimal dan bersepeda statis (Joerger, 2014).

Sebuah penelitian posisi pembalap dilakukan untuk mendapatkan model dinamis tulang belakang pengendara berdasarkan variasi linear dan angular jarak intervertebral di bidang sagital. Sepuluh derajat kebebasan model biomekanik tulang belakang diselesaikan secara numerik. Beban yang lebih besar bekerja pada tulang belakang pengendara sebagian besar terjadi saat duduk dalam posisi olahraga dibandingkan dengan posisi rekreasi atau setengah duduk. Beban aktif daerah tulang lumbar belakang dipengaruhi oleh tekanan ban, gundukan jalan dan kecepatan roda (Griskevicius et al., 2014).

Perpindahan linear dan sudut terbesar ditemukan antara vertebra L4-L5. Otot tulang belakang mengalami beban terbesar dalam posisi duduk. Nilai rotasi vertebra dan variasi linier maksimum dalam interval roda dengan tekanan ban 1,5 bar dan pada kecepatan 10 km/jam adalah 0,46° dan 0,46 mm. Rotasi vertebra maksimum dan nilai variasi linear untuk usia 23 tahun, tinggi 1,74 m, dan massa 73 kg (massa sepeda ~ 7 kg) interval roda dengan tekanan ban 3,5 bar dan pada kecepatan 30 km/jam adalah 3,9° dan 1,23 mm. Variasi terbesar rotasi di bidang sagital antara dua tulang lumbar terdekat adalah sekitar 1°. Karena perpindahan ini, bagian depan cakram yang diberi tekanan dengan 530 N lebih banyak dan bagian cakram punggung lebih sedikit (Griskevicius et al., 2014).

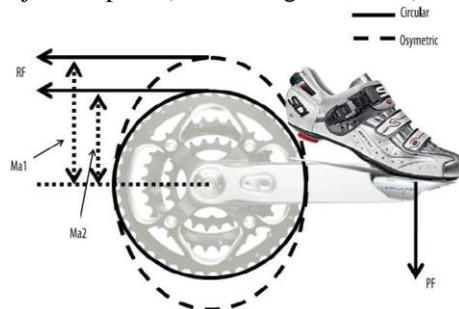


Gambar 3. Tinggi sadel dihitung dari jarak dari simfisis pubis ke tanah (DPSG) dan tiga posisi yang diadopsi selama tes Wingate: ke atas (+2,5% DPSG), posisi referensi, dan ke bawah (-2,5% DPSG) (de Moura et al., 2017)

Sebuah penelitian bertujuan untuk menganalisis kinerja anaerob dan aktivasi otot selama tes bersepeda supramaksimal di tiga posisi sadel yang berbeda. Dua belas pengendara sepeda kompetitif menyelesaikan tes bersepeda dan tiga tes Wingate 30-s dalam tiga ketinggian sadel

(referensi, ke bawah, dan ke atas), dalam urutan acak, pada hari yang berbeda. Ketinggian sadel secara individual bergeser ke bawah dan ke atas (2,5% dari jarak simfisis pubis ke tanah) dari posisi referensi. Hasil penelitian menunjukkan perubahan kecil dalam tinggi sadel yang menghasilkan output daya puncak yang lebih besar. Penyesuaian kecil ketinggian sadel dapat mempengaruhi hubungan kekuatan otot-otot tungkai bawah, dan berpengaruh terhadap kemampuan untuk menghasilkan kekuatan (de Moura et al., 2017).

Aktivitas bersepeda dilakukan dengan gerakan kaki mengayun pedal. Pedal menjadi salah satu topik kajian dalam aspek biomekanika. Mengurangi kerja internal, torsi puncak engkol, dan waktu yang dihabiskan di bagian atas dan bawah pusat mati (masing-masing posisi jam 12 dan jam 6) adalah di antara desain baru pedal. Perubahan dalam kinematika sendi tanpa efek pada aktivasi otot diamati ketika pengendara sepeda menggunakan roda gigi tidak berbentuk lingkaran. Sistem desain khusus berfokus pada peningkatan momen engkol lengan atau poros rantai pada posisi jam 3 dan mengurangi momen engkol lengan atau poros pada posisi jam 9 yang telah memberikan peningkatan efisiensi dan kinerja bersepeda (Bini & Dagnese, 2012).



Gambar 4. Ilustrasi desain roda gigi tidak berbentuk lingkaran untuk meningkatkan momen gaya di posisi jam 12. Momen lengan roda gigi non lingkaran (Ma1), momen lengan roda gigi lingkaran (Ma2), gaya hambat (RF) dan gaya pedal (PF) (Bini & Dagnese, 2012)

Panjang lengan pedal telah dikaji dari aspek biomekanik. Panjang optimum dihitung untuk setiap subyek uji dan dapat memenuhi kriteria panjang optimum pedal = (18,971 x panjang betis) - (7438 x panjang kaki total) + 90,679. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang optimum 16 subyek umumnya 120 - 160 mm. Respon fisiologis subyek menunjukkan bahwa panjang optimum ini mendekati panjang standar produk yaitu 170 mm. Hasil penelitian ini tidak merekomendasikan panjang optimum individual karena tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap respon fisiologis (Sprules, 2000).

Sebuah dinamometer pedal mencatat perubahan teknik mengayuh (komponen normal

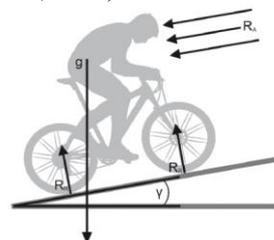
dan tangensial dari gaya yang diterapkan, orientasi engkol, dan orientasi pedal) dari 14 atlet elit untuk 40 km dengan irama kayuhan konstan ketika beban kerja meningkat sesuai kompetisi 40 km. Tujuh subyek tidak menunjukkan perubahan orientasi pedal, dan secara dominan meningkatkan komponen vertikal dari gaya yang diberikan selama *downstroke* ketika beban kerja meningkat. Subyek lain meningkatkan rotasi jari kaki ke atas sepanjang *downstroke* dan meningkatkan komponen horisontal antara 0° dan 90°. Torsi negatif braket bawah selama *upstroke* biasanya menjadi torsi positif (*propulsive*) pada beban kerja tinggi. Namun, torsi selama kenaikan tidak mengurangi total kerja positif selama *downstroke*. Hal ini tidak berkontribusi signifikan terhadap kerja eksternal yang dilakukan karena 98,6% dan 96,3% dari total kerja pada beban kerja rendah dan tinggi yang dilakukan selama *downstroke* (Kautz et al., 1991).

Sebuah penelitian bertujuan untuk menyelidiki efek beban kerja dan irama kayuhan yang berbeda pada kinematika bidang frontal lutut dan kinetika. Delapan belas subyek berpartisipasi dalam penelitian ini. Sistem analisis gerakan digunakan untuk mengumpulkan 5 siklus kinematika selama 2 menit bersepeda dalam 8 kondisi pengujian, yang mencakup lima kondisi beban kerja 0,5, 1, 1,5, 2, dan 2,5 kg pada 60 putaran per menit (rpm), dan empat kondisi irama 60, 70, 80, dan 90 rpm dengan beban kerja 1 kg. Hasil penelitian menunjukkan dua pola momen lutut frontal di antara subyek kami yang perlu diselidiki lebih lanjut (Ying, 2014).

Para pemenang balap sepeda tahapan 3 minggu (seperti Giro d'Italia, Tour de France, Vuelta a Espana) umumnya adalah pembalap yang mendominasi di rute-rute menanjak. Atlet amatir cenderung menghindari medan menanjak karena ketidaknyamanan. Selama menanjak, pembalap perlu mengatasi gravitasi dengan beberapa perubahan postur. Perubahan dilakukan dengan aktivitas otot, sementara kekuatan pedal, dinamika sambungan, dan efisiensi bersepeda tidak banyak berubah selama bersepeda di tanjakan dibandingkan dengan bersepeda di medan datar. Selama bersepeda menanjak, semua aktivitas berbeda ketika dibandingkan bersepeda dengan pendakian yang duduk atau bersepeda di medan yang datar. Penelitian lebih lanjut harus fokus pada studi di luar ruangan dan lereng yang lebih curam (Fonda & Sarabon, 2012).

Efektivitas helm bersepeda untuk mengurangi cedera karena dampak energi tinggi tidak banyak diketahui karena pengujian dirancang untuk energi yang lebih rendah, seperti jatuh miring dari sepeda. Pengurangan risiko cedera dipengaruhi oleh merek helm dimana yang lebih mahal tidak serta merta menghasilkan hasil yang lebih baik. Hasil penelitian menunjukkan perlunya lebih

banyak pekerjaan di bidang peningkatan dan pemahaman biofideliti. Akhirnya, produsen helm harus didesak untuk lebih transparan kepada konsumen tentang kapasitas mitigasi relatif dengan menciptakan sistem penilaian keselamatan helm. (Warnica, 2015).



Gambar 5. Gaya berlawanan utama selama bersepeda menanjak. Di mana g adalah akselerasi karena gravitasi; RA adalah hambatan aerodinamis, RR adalah gaya resistif traktif, dan γ adalah sudut medan (Fonda & Sarabon, 2012).

Aspek Aerodinamika

Sepeda balap melaju dengan kecepatan rata-rata 30-50 km/jam (Syamsuri et al., 2018). Data Tour de France 2011 menunjukkan bahwa rata-rata kecepatan pembalap sepeda peringkat atas sekitar 40 km/jam, namun, kecepatan pada tahap uji coba waktu adalah lebih dari 55 km/jam. Meskipun kecepatan rata-rata di area naik gunung sedikit di bawah 40 km/jam, kecepatan maksimum pada tahap menurun dapat dengan mudah melebihi 100 km/jam (Chowdhury et al., 2011). Dalam olahraga yang melibatkan kecepatan tinggi, balapan seringkali dimenangkan oleh hitungan milidetik. Gaya *drag* yang bekerja terhadap atlet seringkali merupakan kekuatan tertinggi yang harus dilawan oleh atlet dan, bahkan pengurangan *drag* yang kecil, dapat meningkatkan performa (Aggiano, 2010).

Ada beberapa kekuatan resistif berbeda yang mempengaruhi kinerja pengendara sepeda yaitu resistensi aerodinamis, kemiringan jalan, tahanan *rolling*, transmisi penggerak (*drive train*), dan tahanan gesek bantalan roda (Mannion et al., 2016). Aerodinamika memiliki peran penting dalam semua disiplin ilmu ketika kecepatannya lebih dari 20 km/jam (Chowdhury et al., 2011). Ketika bersepeda di permukaan tanah dengan kecepatan lebih dari 14 m/dt, hambatan aerodinamis adalah gaya resistif yang paling penting. Sekitar 90% dari total output daya mekanik diperlukan untuk mengatasinya (Debraux et al., 2011). Hambatan aerodinamis adalah sekitar 80% dari total gaya resistif dalam balap sepeda di jalanan dengan kecepatan 30 km/jam dan hingga 94% dalam uji waktu kompetisi di 50 km/jam (Belloli et al., 2016).

Dalam bersepeda kelompok elit atau profesional, kekuatan resistif didominasi oleh aspek aerodinamika. Baik itu di jalan atau di *velodrome*, olahraga dipengaruhi aerodinamika.

Sejak penemuan sepeda, para insinyur telah berusaha untuk meningkatkan kinerja, seringkali dengan mengurangi *drag* aerodinamis (Lukes et al., 2005). Penelitian juga dilakukan pada perlengkapan pendukung aktivitas bersepeda seperti komponen sepeda yaitu rangka dan ban yang masing-masing dikaji oleh referensi [(McWilliams, 2012) dan (Pogni & Petrone, 2016)], aspek pakaian yang diteliti oleh referensi (Brownlie et al., 2009) dan helm yang dikaji dari aspek aerodinamis oleh referensi [(Alam et al., 2014), (Abdullah et al., 2017), (Fitzgerald et al., 2018)] dan (Syamsuri et al., 2018)] di pembahasan sebelumnya. Hal ini sesuai dengan referensi (Crouch et al., 2017) yang menyebutkan bahwa aerodinamika memiliki dampak mendalam pada kinerja bersepeda di tingkat elit yang mempengaruhi posisi bersepeda dan gaya, desain dan pemilihan peralatan, taktik balap dan model pelatihan, aturan dan pemerintah yang mengatur dan bahkan melakukan desain velodrom baru.

Perubahan yang dilakukan pada posisi pengendara sepeda memiliki dampak terbesar pada hambatan aerodinamis dibandingkan dengan perubahan yang dilakukan pada peralatan. Perubahan posisi berkelompok memiliki dampak yang lebih besar pada hambatan daripada perubahan individu, tetapi perubahan itu bukan aditif. Total untung atau rugi dalam gaya *drag* untuk beberapa perubahan posisi bukanlah jumlah keuntungan atau kerugian individu dalam hambatan. Keuntungan dan kerugian aktual juga bervariasi secara signifikan antara atlet, terutama karena perbedaan ukuran dan bentuk tubuh, pengalaman berkendaraan, dan posisi referensi dari mana perubahan dilakukan (Underwood, 2012).

Parameter kinerja utama bersepeda adalah kecepatan perpindahan pengendara sepeda dan sepeda (v , dalam m/dt). Pada kecepatan konstan, rasio output daya mekanik dihasilkan oleh pengendara sepeda (P , dalam W) ke total gaya resistif (R_T , dalam N) diberikan dengan persamaan:

$$v = \frac{P}{R_T} \quad (1)$$

Persamaan (1) diberlakukan dengan asumsi bahwa output daya adalah jumlah output energi per satuan waktu (Chowdhury et al., 2011).

Gaya hambat total (F) adalah jumlah gaya hambat aerodinamik (F_D) dan gaya *rolling* antara roda dan permukaan jalan (F_R) sehingga:

$$F = F_D + F_R \quad (2)$$

Hambatan aerodinamis meningkat secara kuadrat terhadap kecepatan pengendara sepeda (V) dan tergantung pada area depan pengendara sepeda dan sepeda yang kontak dengan arah angin (A). Hal ini diekspresikan sebagai koefisien hambatan (C_D) yang merupakan ukuran kualitas aliran udara

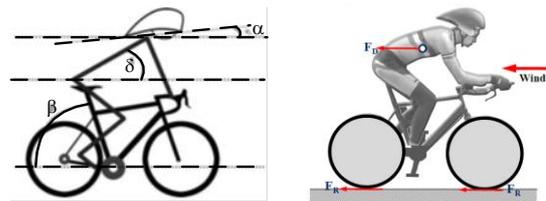
sekitar pengendara sepeda dan sepeda, kepadatan udara, dan kuadrat dari kecepatan jalan. Hambatan aerodinamis (F_D) diekspresikan sebagai:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (3)$$

Di sisi lain, hambatan *rolling* (F_R) tergantung pada total massa sepeda termasuk pengendara dan perlengkapan lainnya, dan diekspresikan sebagai:

$$F_R = C_R mg \quad (4)$$

Dimana C_R adalah koefisien hambatan *rolling*, m adalah massa dan g adalah konstanta gravitasi.



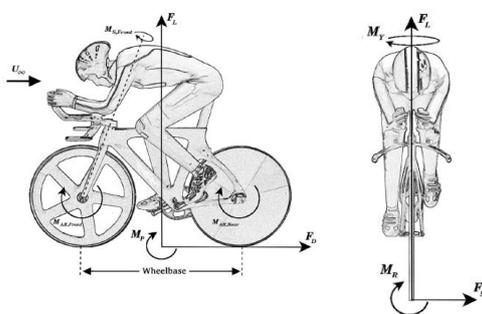
Gambar 6. Pemodelan dan desain parameter aerodinamis balap sepeda (Aggiano, 2010) dan gaya-gaya yang terjadi di balap sepeda (Chowdhury et al., 2011)

Seorang atlet mengalami enam aksi aerodinamis langsung (tiga gaya dan tiga momen), seperti yang ditunjukkan pada gambar 7. Selain itu gaya *drag* yang beraksi dalam arah yang berlawanan dengan gerakan pengendara sepeda, komponen gaya aerodinamis lainnya terdiri dari gaya samping ' F_S ', dan gaya angkat vertikal ' F_L '. Momen didefinisikan tentang pusat sumbu roda sebagai momen *pitching* yang bertindak untuk mengangkat roda depan ' M_P ', momen *roll* ' M_R ', dan momen *yaw* ' M_Y '. Semua gaya dan momen ini dapat digambarkan sebagai koefisien gaya ' C_F ' dan koefisien momen " C_M ", dinormalisasi oleh area frontal dan tekanan dinamis, dimana koefisien momen oleh area depan dan jarak sumbu roda sepanjang ' l ' (Crouch et al., 2017).

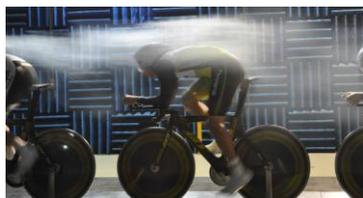
Riset aerodinamika bersepeda dapat dilakukan dengan metode simulasi komputer dan eksperimen menggunakan terowongan angin (*wind tunnel*). *Computational Fluid Dynamics* adalah metode yang dapat digunakan. Fisik angin dan perkotaan menyebabkan kondisi yang sulit untuk dimodelkan dalam lingkungan terowongan angin, dan sementara pengujian trek fisik dan atau velodrome terjadi secara aktual. CFD memungkinkan untuk mengontrol semua parameter model. Metode ini juga memungkinkan kondisi aliran terkontrol untuk mengukur kinerja yang relatif aerodinamis kecil. Selain itu, pemodelan aerodinamika benda penghalang seperti tubuh pengendara sepeda mengikuti

prosedur yang sama untuk memodelkan aliran udara di atas struktur yang kompleks (Mannion et al., 2016).

Penelitian berbasis simulasi telah dilakukan antara lain untuk analisis gaya *drag* dan fenomena perpindahan panas konveksi dari tubuh pembalap berdasarkan perbedaan posisi. CFD digunakan untuk 19 segmen tubuh pengendara untuk tiga posisi berbeda. Pengaruh kecepatan angin pada *drag* dianalisis, menunjukkan ketergantungan angka Reynolds terhadap *drag*, di mana posisi yang lebih ramping menunjukkan ketergantungan angka Reynolds yang lebih tinggi. *Drag* dan koefisien perpindahan panas konvektif (CHTC) dari segmen dan seluruh tubuh dibandingkan untuk semua posisi pada kecepatan balap, menunjukkan nilai *drag* tinggi untuk kepala, kaki dan lengan serta CHTC tinggi untuk kaki, lengan, tangan dan kaki (Defraeye et al., 2011).

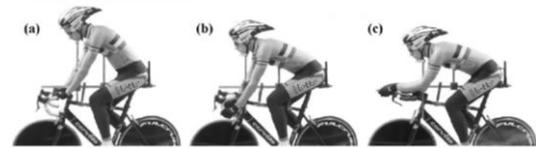


Gambar 7. Pengendara sepeda, gaya dan momen aerodinamis berpusat di alas roda dengan momen kemudi dan aerodinamis yang bekerja di roda (Crouch et al., 2017).



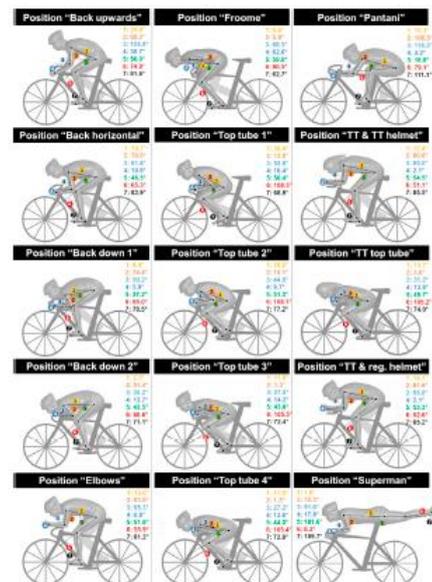
Gambar 8. Visualisasi aliran angin di terowongan angin (Crouch et al., 2017)

Daerah *drag* dari segmen tubuh individu sangat bervariasi untuk posisi pengendara yang berbeda sedangkan kehilangan atau pelepasan panas konvektif dari segmen tubuh ditemukan kurang sensitif terhadap pengaruh posisi. Korelasi kecepatan angin dengan CHTC diderivasikan, dimana eksponen hukum daya tidak berbeda secara signifikan untuk segmen tubuh individu untuk semua posisi, di mana nilai rata-rata 0,84 ditemukan. Studi CFD serupa dapat dilakukan untuk menentukan gaya hambat dan CHTC pada resolusi spasial yang lebih tinggi untuk aplikasi olahraga lain, desain peralatan sepeda atau untuk menilai transfer kelembaban konvektif (Defraeye et al., 2011).



Gambar 9 Posisi pembalap (a) tegak (*upright position*), (b) terjatuh (*dropped position*), (c) posisi *time-trial* (Defraeye et al., 2011)

Perbedaan posisi pembalap juga dikaji dari perbedaan posisi saat menuruni bukit atau gunung. Penelitian dilakukan dengan simulasi CFD dan eksperimen menggunakan model skala seperempat untuk 15 posisi berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa posisi "*Froome*" yang terkenal selama lintasan menurun *Peyresourde* pada tahap 8 Tour de France 2016 tidak aerodinamis. Posisi lain hingga 7,2% lebih cepat dan juga lebih aman karena mereka memberikan distribusi bobot tubuh yang lebih merata di kedua roda. Juga beberapa posisi yang memungkinkan pembangkitan daya lebih besar memiliki aspek aerodinamis yang lebih unggul (Blocken et al., 2018).



Gambar 10. Lima belas posisi saat turun bukit (Blocken et al., 2018)

Simulasi lain menggunakan CFD dilakukan untuk peloton sepeda yaitu kelompok utama yang mengendarai sepeda secara. Studi sebelumnya pada kelompok kecil pengendara sepeda *in-line* menunjukkan pengurangan hingga 50% pada pengendara yang terisolasi pada kecepatan yang sama dan nilai-nilai ini juga telah digunakan untuk peloton. Namun, di dalam peloton yang penuh sesak dengan beberapa baris pengendara yang menyediakan tempat berlindung, pengurangan *drag* yang lebih besar dapat diharapkan. Penelitian dilakukan untuk mempelajari pengurangan hambatan dalam dua

peloton dari formasi 121. Simulasi ini selanjutnya juga dibandingkan dengan eksperimen di terowongan angin (Blocken et al., 2018b).

Eksperimen aerodinamika juga dilakukan dengan pengukuran skala penuh gaya-gaya aerodinamika pada sepeda dan posisi tubuh yang berbeda serta variasi roda gigi dengan variasi kecepatan angin. Temuan eksperimental menunjukkan bahwa sepeda *time trial* memiliki gaya *drag* lebih rendah dari balap jalanan dan sepeda gunung. *Time trial* memiliki sekitar 36% dan sepeda balap jalan memiliki drag sekitar 21% lebih sedikit dari pada sepeda gunung. Hasil juga menunjukkan bahwa posisi *time trial* memiliki nilai C_D terendah. Sekitar 30% dan 45% pengurangan hambatan dimungkinkan di balap jalan dan posisi *time trial* masing-masing dibandingkan dengan posisi rekreasi (Blocken et al., 2018b).

Eksperimen juga dilakukan untuk meneliti pengaruh angin arah melintang (*crosswind*). Respons aerodinamis dari dua sepeda skala penuh dengan dan tanpa manekin untuk variasi sudut *crosswind* mulai dari 0° - 90° (interval 15°). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan yang diinduksi angin adalah fungsi dari sudut *crosswind*. Beban aerodinamis sebenarnya yang timbul dari angin seperti itu dapat mencapai sekitar 2,5 kali hambatan aerodinamik. Sudut tubuh memiliki sedikit pengaruh pada koefisien gaya lateral. Tipe sepeda secara signifikan mempengaruhi gaya aerodinamis yaitu pada sudut yaw besar, sekitar 60% dari total koefisien gaya lateral (Fintelman et al., 2014).

Eksperimen sebagai tindak lanjut hasil simulasi juga dilakukan referensi (Blocken et al., 2018b). Eksperimen dilakukan dengan membuat model dengan skala seperempat. Hasil menunjukkan bahwa hambatan semua pengendara sepeda di peloton berkurang dibandingkan dengan pengendara yang terisolasi. Posisi di tengah belakang peloton berkurang menjadi 5%-10% untuk pembalap yang terisolasi. Ini sesuai dengan "kesetaraan kecepatan bersepeda" yaitu 4,5 hingga 3,2 kali lebih kecil dari kecepatan peloton. Hasil eksperimen ini dapat digunakan untuk meningkatkan strategi bersepeda.



Gambar 11. Model skala seperempat pembalap tunggal dan kelompok (Blocken et al., 2018b)

Drafting adalah metode untuk mengurangi energi bersepeda karena pembalap di belakang kelompok mengalami lebih sedikit hambatan aerodinamis. Hasil penelitian sesuai dengan riset dimana tren penurunan pengurangan

drag dengan jarak d . Pada jarak maksimum yang dikaji, sekitar 1 meter, terjadi pengurangan sebesar 38%. Penurunan gaya hambat pada jarak 20 cm turun dari 41% pada 0° ke 30% pada 5° . Hasil juga menunjukkan efek tidak nol pada pengendara terdepan. Bahkan, jika pengurangan hambatan pada pengendara sepeda terdepan kecil dibandingkan dengan efek pada yang tertinggal. Beberapa persen dari manfaatnya jelas terlihat seperti untuk pengendara sepeda tambahan dimana pengurangan meningkat seiring jarak d menurun (Belloli et al., 2016).



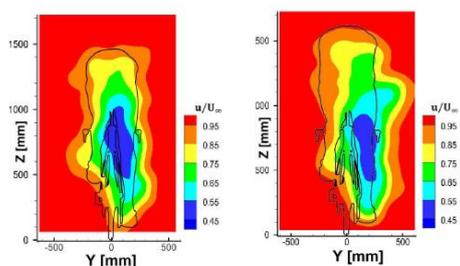
Gambar 12. Uji terowongan angin pembalap dengan jarak d (Belloli et al., 2016)

Simulasi dan eksperimen juga dilakukan untuk pembalap yang diikuti sepeda motor pegawai. Pengurangan *drag* pengendara sepeda naik hingga 8,7% untuk sepeda motor pengawal tunggal dan menjadi 13,9% untuk tiga sepeda motor pada jarak 0,25 m di belakang pengendara sepeda. Jarak ini tidak jarang terjadi di kelompok elit. Efeknya dengan satu motor berikut di jarak pendek realistis $d=0.25$ m (8,7%), $d=0.5$ m (6,4%) dan $d=1$ m (3,8%) lebih besar dari pembalap yang diikuti mobil pada jarak pendek $d=5$ m (1,4%). Karena itu dapat dikatakan bahwa sepeda motor dalam balapan tidak hanya lebih berbahaya tetapi juga secara aerodinamis lebih berpengaruh. Studi ini memperkuat keharusan bagi International Cycling Union untuk mengubah peraturan tentang sepeda motor pengawal, bukan hanya untuk menghindari kecelakaan tetapi juga untuk menghindari manfaat aerodinamis yang tidak diinginkan (Blocken et al., 2016).

Gaya hambat aerodinamis juga diteliti untuk kompetisi balap tandem serta membandingkan posisi balap di jalanan dan posisi *time trial*. Simulasi dengan CFD juga dilanjutkan dengan eksperimen. Bersepeda tandem memiliki komplikasi memiliki dua atlet yang berdekatan satu sama lain di sepeda tandem tunggal. Deviasi gaya *drag* maksimum sebesar 4,9% ditemukan antara percobaan terowongan angin dan simulasi CFD dari model skala seperempat. Simulasi CFD skala penuh untuk pengaturan tandem tegak, berjongkok, uji-waktu, dan *frame-clench* dilakukan. Posisi tandem paling aerodinamis ditemukan dalam pengaturan *frame-clench* yang unik dan memiliki $C_D A$ sebesar $0,286 \text{ m}^2$, dan dapat memberikan keuntungan sebesar 8,1 detik dari pengaturan uji-waktu standar untuk lintasan 10 km (Mannion et al., 2018).

Selain eksperimen di terowongan angin, eksperimen juga dilakukan di velodrome. Penelitian dilakukan untuk penerapan metode visual dengan menggunakan kamera video. Hasil rekaman dapat menjadi dasar bagi analisis gerak dan kajian aerodinamikanya. Penelitian ini dilakukan karena kesulitan dalam kecepatan gerak dan memisahkan latar belakang kondisi lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan aspek lokasi sepeda menggunakan lebih dari 90.000 klip, dengan akurasi sampel lebih dari 98%, yaitu dengan memicu pelacakan posisi sepeda dengan benar dan halus (Carey et al., 2017).

Penelitian juga dilakukan untuk metode aerodinamis. Terowongan angin memiliki kelemahan dalam pengamatan pola aliran udara. Dua contoh dibahas di mana resolusi tinggi *Particle Image Velocimetry* (PIV) telah dilakukan di saluran air untuk menyelidiki dinamika pembalap tunggal dan aliran sekitarnya. Area ini sebelumnya sulit diukur secara eksperimental menggunakan teknik pengukuran intrusif. Contoh pertama memberikan perbandingan pembangkitan gelombang skala 1: 4.5 di saluran air dan manekin pembalap skala penuh di terowongan angin. Contoh kedua menunjukkan aplikasi PIV untuk mengukur bidang aliran antara dua contoh. Pembangkitan gelombang menunjukkan kesesuaian pada variasi bilangan Reynold. Model *drafting* menunjukkan bahwa jika jarak antar pembalap lebih besar dari panjang sepeda, maka pembalap yang di belakang tidak mendapatkan pengaruh pembangkitan gelombang oleh pembalap depan (Crouch et al., 2015).



Gambar 13. Contoh profil kecepatan aliran dengan metode Ring of Fire untuk posisi *time trial* dan posisi tegak (Spoelstra et al., 2018)

Metode pengukuran yang disebut *the Ring of Fire* diterapkan untuk studi aerodinamis. Sistem ini mengandalkan penggunaan skala besar PIV stereoskopis dan kekekalan momentum dengan volume kontrol dalam kerangka referensi yang bergerak bersama dengan atlet. Pembalap pada kecepatan sekitar 8 m/dt, sesuai ukuran tubuh berbasis angka Reynolds $3,2 \times 10^5$. Pengukuran pembangkitan gelombang di awal dan di aliran dilakukan pada laju 2 kHz dalam bidang pengukuran sekitar $1000 \times 1700 \text{ mm}^2$. Sebuah perbandingan dengan pengukuran keseimbangan gaya di terowongan angin menunjukkan

perbedaan yang mungkin sebagian disebabkan oleh penyangga sepeda dan rantai stasioner. Perbedaan *drag* 25% diukur antara pembalap dalam posisi tegak dan *time-trial*, yang sesuai dengan literatur (Spoelstra et al., 2018).

PENUTUP

Hasil kajian menunjukkan bahwa penelitian balap sepeda dari sudut pandang rekayasa teknik telah dilakukan pada beberapa aspek antara lain komponen sepeda, teknik bersepeda, aspek pakaian, helm, aspek aerodinamika dan kombinasi aspek-aspek tersebut. Aspek aerodinamika merupakan topik yang banyak dikaji dengan banyaknya literatur yang didapat. Hal ini disebabkan karena hambatan angin merupakan faktor utama dalam balap sepeda. Aspek aerodinamika diteliti dengan metode simulasi komputer dan eksperimen di terowongan angin dengan model skala kecil atau skala penuh. Aspek kedua adalah aspek biomekanika karena bersepeda berhubungan langsung dengan gerak atlet yang melibatkan kontraksi otot sebagai bentuk pembangkitan energinya. Review menunjukkan bahwa tren utama penelitian saat ini dan di masa depan adalah aspek aerodinamis dan biomekanika.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Fanani, 2018, *Rute Tour de Banyuwangi Ijen 2018 diacungi jempol Federasi Sepeda Dunia*, <http://www.sportdetik.com>, diakses tanggal 11 Maret 2018
- A. Fanani, 2018b, *Dimulai besok, inilah rute Tour de Banyuwangi Ijen 2018*, <http://www.sport.detik.com>, diakses tanggal 11 Maret 2019
- A. Santalla, J.M. Manzano, M. Pe´rez, A. Lucia, 2002, *A new pedaling design: the rotor-effects on cycling performance*, *Medicine & Science In Sports & Exercise* 34(11): 1854-1858
- A. Spoelstra, W. Terra, A. Sciacchitano, 2018, *The ring of fire for in-field sport aerodynamic investigation*, proceeding of ISEA 2018 “Engineering of Sport”: 1-7
- B. Blocken, T. van Druenen, Y. Toparlar, F. Malizia, P. Mannion, T. Andrienne, T. Marchal, G-J. Maas, J. Diepens, 2018b, *Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing*, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 179(2018): 319-337
- B. Blocken, T. van Druenen, Y. Toparlar, T. Andrienne, 2018, *Aerodynamic analysis of different cyclist hill descent positions*, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 181(2018): 27-45

- B. Blocken, Y. Toparlar, T. Andrienne, 2016, *Aerodynamic benefit for a cyclist by a following motorcycle*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 155(2016): 1-10
- B. Fonda, N. Sarabon, 2010, *Biomechanics of cycling (Literature review)*, Sport Science Review XIX(1-2): 187-210
- B. Fonda, N. Šarabon, 2012, *Biomechanics and energetics of uphill cycling: a review*, Kinesiology 44(1): 5-17
- B.M. de Moura, V.L. Moro, M. Rossato, R.D. de Lucas, F. Diefenthaler, 2017, *Effects of saddle height on performance and muscular activity during the wingate test*, J. Phys. Educ. 28(2838)
- C. McWilliams, 2013, *Bicycle frame shape and the effect on performance, an aerodynamic study of the trek KVF frame*, Thesis, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Arkansas, Fayetteville
- D. Priyasidarta, Ariandono, 2018, *Balap sepeda Tour de Banyuwangi Ijen lewati rute terberat*, <http://www.sport.tempo.co>, diakses tanggal 11 Maret 2019
- D.M. Fintelman, M. Sterling, H. Hemida, F.-X. Li, 2014, *The effect of crosswinds on cyclists: an experimental study*, Procedia Engineering 72(2014): 720–725
- E.B. Sprules, 2000, *The biomechanical effect of crank length arm on cycling mechanics*, Thesis, Master of Science, School of Human Kinetics, University of British Columbia
- E.W. Faria, D.L. Parker, I.E. Faria, 2005, *The science of cycling, physiology and training – part 1*, Sports Med 35 (4): 285-312
- E.W. Faria, D.L. Parker, I.E. Faria, 2005b, *The science of cycling factors affecting performance – part 2*, Sports Med 35 (4): 313-337
- F. Alam, H. Chowdhury, H.Z. Wei, I. Mustary, G. Zimmer, 2014, *Aerodynamics of ribbed bicycle racing helmets*, Procedia Engineering 72(2014): 691 – 696
- Fang, Ying, 2014, *Effects of cycling workload and cadence on frontal plane knee load*, Master's Thesis, University of Tennessee
- G. Marcolin, N. Petrone, C. Reggiani, F.A. Panizzolo, A. Paoli, 2015, *Biomechanical comparison of shorts with different pads, an insight into the perineum protection issue*, Medicine 94(29): 1-
- H. Chowdhury, F. Alam, I. Khan, 2011, *An experimental study of bicycle aerodynamics*, International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), 6(2): 269-274
- H. Trenchard, E. Ratamero, A. Richardson, M. Perc, 2015, *A deceleration model for bicycle peloton dynamics and group sorting*, Applied Mathematics and Computation 251(2015): 24–34
- J. Griskevicius, A. Linkel, J. Pauk, 2014, *Research of cyclist's spine dynamical model*, Acta of Bioengineering and Biomechanics 16(1): 37-44
- J.D. Joerger, 2014, *Muscle activity and power output between stationary and outdoor cycling*, Thesis, Bachelor of Science - Comprehensive Kinesiology, University of Nevada, Las Vegas
- J.J. Peiffer, C.R. Abbiss, 2010, *The influence of elliptical chainrings on 10 km cycling time trial performance*, International Journal of Sports Physiology and Performance 2010(5): 459-468
- L. Aggiano, 2010, *Drag reduction and aerodynamic performances in Olympic sports*, Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Department of Energy and Process Engineering, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology
- L. Brownlie, C. Kyle, J. Carbo, N. Demarest, E. Harber, R. MacDonald, M. Nordstrom, 2009, *Streamlining the time trial apparel of cyclists: the Nike Swift Spin project*, Sports Technol. 2(1–2): 53–60
- L. Underwood, 2012, *Aerodynamics of track cycling*, A thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering, The University of Canterbury, New Zealand
- M. Belloli, S. Giappino, F. Robustelli, C. Somaschini, 2016, *Drafting effect in cycling: investigation by wind tunnel tests*, Procedia Engineering 147(2016): 38 – 43
- M. Pogni, N. Petrone, 2016, *Comparison of the aerodynamic performance of five racing bicycle wheels by means of CFD calculations*, Procedia Engineering 147(2016): 74 – 80
- M. Yunus, S.Y. Saputra, 2017, *Komparasi rasio gir (53x17), (53x19) dan (53x21) dengan tinggi tanjakan 5% terhadap kecepatan maksimal pembalap sepeda pemula*, Motion VIII(2): 140-149
- M.C. Ashe, G.C. Scroop, P.I. Frisken, C.A. Amery, M.A. Wilkins, K.M. Khan, 2003, *Body position affects performance in untrained cyclists*, Br J Sports Med 2003(37): 441–444
- M.J. Warnica, 2015, *Biomechanical assessment of cycling helmets: the influence of headform and impact velocity based on bicycle collisions associated with injury claims*, Thesis, Master of Science, University of Waterloo, Ontario, Canada

- M.N. Abdullah, M.K.H. Muda, F. Mustapha, M.A. Shamsudin, 2017, *Aerodynamics analysis for an outdoor road cycling helmet and air attack helmet*, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing 5(1): 46-50
- P. Carey, S. Bennett, J. Lasenby, T. Purnell, 2017, *Aerodynamic analysis via foreground segmentation*, proceeding of IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2017 Computer Vision Applications in Sports: 10-14
- P. Debraux, F. Grappe, A.V. Manolova, W. Bertucci, 2011, *Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment*, Sports Biomechanics 10(3): 197-218
- P. Mannion, E. Clifford, B. Blocken, M. Hajdukiewicz, 2016, *Assessing aerodynamic performance in cycling using computational fluid dynamics*, proceeding of Civil Engineering Research in Ireland Conference (CERI 2016) Galway
- P. Mannion, Y. Toparlar, B. Blocken, E. Clifford, T. Andriane, M. Hajdukiewicz, 2018, *Aerodynamic drag in competitive tandem para-cycling: road race versus time-trial positions*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 179: 92-101
- P.L. Vairakanna, M. Chandran, 2017, *Design and material study of race bike crank*, International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology, 6(4): 102-107
- R.A. Lukes, S.B. Chin, S.J. Haake, 2005, *The understanding and development of cycling aerodynamics*, Sports Engineering 8(2005): 59-74
- R.R. Bini, F. Dagnese, 2012, *Noncircular chainrings and pedal to crank interface in cycling: a literature review*, Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum 14(4): 470-482
- S. Fitzgerald, H. Atkins, R. Kelso, A. Dimitriou, 2018, *Bicycle helmets—are low drag and efficient cooling mutually exclusive?*, Proceeding of ISEA 2018 “Engineering of Sport” 2, 212; doi:10.3390/proceedings2060212: 1-6
- S.A. Kautz, M.E. Feltner, E.F. Coyle, A.M. Baylor, 1991, *The pedaling technique of elite endurance cyclists: changes with increasing workload at constant cadence*, International Journal Of Sport Biomechanics 1991(7): 2963
- Syamsuri, H. Syafik M, Y.P. Iswanto, 2018, *Study the effect of angle of attack on flow characteristics at racing bike helmet using CFD*, Proceeding of MATEC Web of Conferences 204, 06001 (2018), IMIEC 2018: 1-6
- T. Defraeye, B. Blocken., E. Koninckx., P. Hespel., J. Carmeliet, 2011, *Computational fluid dynamics analysis of drag and convective heat transfer of individual body segments for different cyclist positions*, Journal of Biomechanics 44(9): 1695-1701
- T.N. Crouch, D. Burton, Z.A. LaBry, K.B. Blair, 2017, *Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics*, Sports Eng 20(2017): 81–110
- T.N. Crouch, N. Barry, J.A Venning, D. Burton, M.C. Thompson, J. Sheridan, 2015, *The application of laser diagnostics to cycling aerodynamics*, Proceeding of 7th Australian Conference on Laser Diagnostics in Fluid Mechanics and Combustion Melbourne, Australia: 161-165
- U. Emanuele, J. Denoth, 2012, *Power–cadence relationship in endurance cycling*, Eur J Appl Physiol 2012(112): 365–375
- Z. Taha, M.H.A. Hassan, A.P.P.A. Majeed, M.A. Aris, N.N. Sahim, 2013, *An overview of sports engineering: history, impact and research*, Movement, Health & Exercise 2: 1-14

