

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kualitas Telur Ayam

Telur adalah bahan alami yang dapat disimpan pada suhu ruangan. Pertukaran gas antara bagian dalam telur dan atmosfer akan mengubah sifat putih telur yang berperan penting dalam pertahanan alami terhadap bakteri. Penyimpanan pada suhu ruang dengan cepat mengubah sistem pertahanan anti bakteri pada putih telur (Rehault-Godbert *et al.*, 2010). Suhu yang lebih rendah akan memperlambat laju pertumbuhan bakteri (Yadav dan Vadehra, 2017). Pada penelitian ini uji kualitas telur dilakukan pada telur segar setelah dikoleksi dari kandang. Hasil uji kualitas telur ditulis pada Tabel 1.

Tabel 1. Kualitas telur ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul ($\bar{Y} \pm SEM$)

| Variabel | <i>Hy-Line Brown</i> | Sentul |
|------------------------------------|----------------------|--------------------|
| Produksi Telur selama 8 minggu (%) | $97,87 \pm 0,17^a$ | $67,98 \pm 0,44^b$ |
| Bobot Telur (gram) | $62,42 \pm 0,23^a$ | $50,72 \pm 0,18^b$ |
| Bobot Putih Telur (gram) | $32,40 \pm 0,35^a$ | $26,19 \pm 0,17^b$ |
| Bobot Kuning Telur (gram) | $21,60 \pm 0,11^a$ | $17,62 \pm 0,14^b$ |
| Haught Unit | $95,55 \pm 0,34^a$ | $86,71 \pm 0,53^b$ |
| Warna Kuning Telur (skala) | $8,49 \pm 0,05^a$ | $8,62 \pm 0,05^a$ |
| Bobot Kerabang (gram) | $8,26 \pm 0,06^a$ | $6,83 \pm 0,04^b$ |
| Tebal Kerabang (mm) | $0,38 \pm 0,001^a$ | $0,37 \pm 0,001^b$ |
| Kuat Kerabang (kgf) | $0,42 \pm 0,005^a$ | $0,34 \pm 0,006^b$ |
| Warna Kerabang (skala) | $13,90 \pm 0,05^a$ | $8,62 \pm 0,05^b$ |

Keterangan : \bar{Y} : rata-rata; SEM : standard error of mean; huruf superskrip yang berbeda pada baris yang sama menunjukkan perbedaan sangat nyata ($P<0,01$)

Berdasarkan Tabel 1, secara umum ayam *Hy-Line Brown* menunjukkan performa yang lebih unggul dalam hampir semua karakteristik produksi dan kualitas telur yang diukur dibandingkan dengan ayam Sentul, kecuali pada warna kuning telur tidak ada perbedaan signifikan. Perbedaan tersebut diduga karena seleksi genetik intensif pada ayam komersial untuk meningkatkan produksi telur. Seleksi dapat mempengaruhi perkembangan folikel ovarium yang berdampak pada ukuran dan kualitas telur. Menurut Nataamijaya (2020), ayam Sentul sebagai ayam asli Indonesia memiliki produktivitas lebih rendah tetapi lebih tahan terhadap stres lingkungan. Hal tersebut sesuai penelitian Sarica *et al.* (2010) bahwa genotipe ayam impor (komersial) menunjukkan nilai yang lebih baik pada produksi dan sebagian besar karakteristik kualitas telur dibandingkan dengan

genotipe ayam lokal. Menurut Putri *et al.* (2021), telur ayam lokal memiliki keunggulan dalam kualitas organoleptik (rasa dan tekstur) yang lebih disukai konsumen.

Produksi telur ayam *Hy-Line Brown* (97,87%) lebih tinggi daripada Sentul (67,98%), sesuai dengan sifat genetik unggul ayam komersial yang dioptimalkan untuk produktivitas tinggi. Perbedaan ini konsisten dengan penelitian Khan (2008) bahwa ayam komersial secara genetik diseleksi ketat untuk menghasilkan produksi telur tinggi melebihi 90% pada puncak produksi. Ayam lokal (Sentul) memiliki produksi telur lebih rendah diduga karena seleksi tidak dilakukan secara terarah sehingga potensi genetiknya belum jelas. Dessie *et al.* (2011) menyatakan produksi telur ayam lokal di daerah tropis umumnya berkisar 35-65%, tidak berbeda jauh dengan ayam Sentul.

Berdasarkan Tabel 1, terdapat perbedaan antara bobot telur ayam komersial dan lokal ($P<0,01$). Bobot telur *Hy-Line Brown* (62,42 g) lebih berat dibanding Sentul (50,72 g). Hal tersebut sesuai dengan penelitian Underwood *et al.* (2021) bahwa ayam komersial menghasilkan telur 15–20% lebih berat akibat seleksi genetik jangka panjang. Bobot telur merupakan karakteristik yang sering digunakan sebagai kriteria seleksi. Umur ayam mempengaruhi bobot telur, semakin tua umur ayam semakin besar bobot telurnya (Iqbal *et al.*, 2017). Berdasarkan bobohnya, telur dikelompokkan menjadi 4 yaitu *Small* (S) bila bobot telur kurang dari 53 g; *Medium* (M) ukuran sedang 53–62 g; *Large* (L) telur besar dengan bobot 63– 72 g; dan *Extra Large* (XL) yaitu telur sangat besar bila lebih 73 g. Golongan M dan L merupakan golongan yang paling banyak dijual karena sesuai dengan permintaan konsumen (Gautron *et al.*, 2022). Ayam *Hy-Line Brown* menghasilkan telur dengan bobot rata-rata $62,42 \pm 0,23$ g, lebih berat dibandingkan telur ayam Sentul yang memiliki bobot rata-rata $50,72 \pm 0,18$ g, dengan deviasi 11,70 g. Hal tersebut mengindikasikan bahwa ayam *Hy-Line Brown* cenderung menghasilkan telur berukuran lebih besar. Tingginya deviasi tersebut diduga berhubungan dengan kemampuan genetik ayam. Ayam Sentul merupakan ayam lokal yang dipelihara secara sederhana dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan protein keluarga dengan produksi telur 19,28 butir/ekor (Sudrajat dan Isyanto, 2018a, 2018b). Ayam komersial merupakan ayam yang sudah dilakukan seleksi cukup panjang dengan tujuan khusus memproduksi telur. Bobot telur ayam *Hy-Line Brown* pada penelitian lain tercatat $61,50 \pm 0,67$ g (Thanapal *et al.*, 2021), kisarannya 59,73 - 66,72 g (Biesiada-drzazga *et al.*, 2022).

Semua komponen bobot (telur utuh, putih telur, kuning telur, kerabang) pada ayam *Hy-Line Brown* secara signifikan lebih berat dibanding Sentul. Bobot telur, bobot kuning telur, bobot putih telur dan bobot kerabang saling berhubungan. Bobot putih telur menunjukkan perbedaan ($P<0,01$) antara ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul. Rata-rata bobot putih telur lebih tinggi pada ayam komersial ($32,40 \pm 0,35$ g) dibandingkan dengan ayam lokal ($26,19 \pm 0,17$ g). Hal tersebut terjadi karena ayam komersial menghasilkan telur yang lebih besar sehingga komponen telurnya (kuning telur dan albumen) juga lebih berat. Menurut Sözcü *et al.*(2021) ayam komersial umumnya mempunyai tubuh lebih besar sehingga menghasilkan telur lebih besar dengan komponen lebih berat. Ayam lokal umumnya bertubuh lebih kecil dan menghasilkan telur lebih kecil. Penelitian ini menggunakan ayam *Hy-Line Brown* dengan rata-rata bobot badan $1.982 \pm 101,23$ g dan Sentul $1.543 \pm 107,14$ g.

Bobot kerabang telur antara ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul terdapat perbedaan yang signifikan ($P<0,05$). Rata-rata bobot kerabang telur lebih tinggi pada ayam *Hy-Line Brown* ($8,26 \pm 0,06$ g) dibandingkan dengan ayam Sentul ($6,83 \pm 0,04$ g). Telur yang lebih besar dari ayam komersial secara alami juga memiliki bobot kerabang yang lebih besar. Ketta dan Túmová (2018) menyatakan bahwa kualitas telur, termasuk bobot kerabang, dipengaruhi oleh ras ayam sehingga pada strain tertentu didapatkan hasil yang lebih baik untuk sifat-sifat kualitas telur tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa variasi genetik dan perbedaan ras dapat berkontribusi terhadap variasi bobot kerabang telur antara ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul.

Haugh unit (HU) adalah karakteristik penting untuk menilai kualitas telur, terutama dalam hal karakteristik internal telur. HU dihitung menggunakan berat telur utuh dan tinggi albumen. Nilai HU yang lebih tinggi menunjukkan kualitas yang lebih baik (Sheidaee dan Bayzar, 2021). Dalam penelitian ini, ayam *Hy-Line Brown* memiliki HU yang lebih tinggi ($95,55 \pm 0,34$) dibandingkan dengan ayam Sentul ($86,71 \pm 0,53$). Hal tersebut menunjukkan kualitas telur ayam *Hy-Line Brown* lebih baik dalam hal kesegaran. Nilai HU mencerminkan kesegaran dan kualitas keseluruhan telur. HU mengukur kualitas albumen (kekentalan). Nilai HU lebih dari 72 mempunyai kualitas sangat baik atau "AA", nilai HU 60 -72 termasuk "A", dan kurang dari 60 "B" (Sheidaee dan Bayzar, 2021). Berdasarkan Tabel 1, nilai HU ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul termasuk kualitas baik (AA/A), tetapi *Hy-Line Brown* menunjukkan albumen lebih kental. Albumen pada ayam *Hy-Line Brown* $32,40 \pm 0,35$ g,

sedangkan Sentul $26,19 \pm 0,17$. Kim *et al.* (2014) menyatakan HU berhubungan dengan genetik ayam sehingga pada ayam yang berbeda dihasilkan HU yang tidak sama.

Warna kuning telur antara ayam komersial dengan ayam lokal relatif sama ($P>0,05$). Rata-rata warna kuning telur ayam *Hy-Line Brown* menggunakan skala indeks adalah $8,64 \pm 0,05$ dan ayam Sentul $8,49 \pm 0,05$. Warna kuning telur dapat diklasifikasikan dari terang sampai gelap menggunakan skala indeks 1 hingga 15 (Thepparak *et al.*, 2024). Warna kuning telur tidak berbeda karena warna kuning telur berkaitan dengan pakan yang diberikan. Ayam membutuhkan makanan yang kaya pigmen untuk menghasilkan kuning telur yang lebih gelap. Pada penelitian ini pakan yang diberikan pada ayam komersial dan lokal mengandung nutrisi yang sama sehingga warna kuning telur yang dihasilkan relatif sama. Gautron *et al.* (2022) berpendapat bahwa manajemen pemeliharaan berpengaruh terhadap warna kuning telur. Kandungan pakan dapat menyebabkan perubahan warna kuning telur (Hammershøj dan Johansen, 2016). Kowalska *et al.* (2020) menyatakan bahwa warna kuning telur sangat bergantung pada suplementasi pakan dan dapat disesuaikan pada semua jenis ayam. Warna kuning telur terutama ditentukan oleh pigmen karotenoid (xantofil) dalam pakan. Menurut Zurak *et al.* (2022) karotenoid merupakan pigmen yang berperan penting dalam menentukan warna kuning telur. Kuning telur mempengaruhi persepsi konsumen (Berkhoff *et al.*, 2020), dan juga menjadi pertimbangan konsumen dalam membeli telur (Spada *et al.*, 2016). Warna kuning telur yang gelap lebih disukai konsumen (Grashorn, 2016). Umumnya konsumen lebih menyukai indeks warna 9, sedangkan indeks 14 jarang disukai oleh konsumen (Sandeski *et al.*, 2014).

Berdasarkan Tabel 1, terdapat perbedaan tebal kerabang telur ayam *Hy-Line Brown* ($0,38 \pm 0,02$ mm) dengan ayam Sentul ($0,37 \pm 0,02$ mm). Perbedaan signifikan ini terkait erat dengan bobot kerabang telur yang lebih besar pada *Hy-Line Brown* dan kemungkinan perbedaan efisiensi metabolisme kalsium. Menurut Nowaczewski *et al.* (2010) terdapat korelasi positif antara bobot telur dan kerabang. Choi *et al.* (1983) menyatakan bahwa kerabang telur mempunyai hubungan langsung dengan bobot telur. Perbedaan tebal kerabang relatif kecil ($0,01$ mm), tapi dampaknya pada kekuatan telur bisa signifikan. Kekuatan kerabang Sentul ($0,34$ kgf) masih di atas ambang batas kerusakan mekanis minimal ($0,25$ - $0,30$ kgf), tetapi lebih rentan daripada *Hy-Line Brown*. Kerabang telur adalah faktor kritis untuk keutuhan telur. Kalsium merupakan komponen utama kerabang telur, yang terdiri dari 94-97% kalsium karbonat. Ayam petelur memerlukan pasokan kalsium

yang konsisten dalam pakannya untuk menghasilkan kerabang telur yang kuat. Kekurangan asupan kalsium dapat menyebabkan kerabang telur yang tipis atau retak (Arias, 2024). Ayam petelur memerlukan sekitar 2,2 gram kalsium untuk menghasilkan satu butir telur, dan sekitar 60–75% kalsium yang diperlukan untuk pembentukan kerabang telur berasal langsung dari pakan, sementara 25–40% kalsium diperoleh dari tulang meduler (Gloux *et al.*, 2020).

Terdapat perbedaan kekuatan kerabang antara ayam komersial dan lokal ($P<0,01$). Kekuatan kerabang ayam *Hy-Line Brown* $0,42 \pm 0,05$, lebih tinggi dibanding ayam Sentul $0,34 \pm 0,06$. Kerabang telur yang lebih kuat pada ayam *Hy-Line Brown* diduga karena penyerapan efisiensi pakan yang tinggi dari pengaruh seleksi intensif pada ayam komersial. Faktor penting dalam menentukan kekuatan kerabang telur bukanlah sistem produksinya, melainkan genetik dan pemberian pakan pada ayam tersebut (Gautron *et al.*, 2022). Kalsium pakan diperlukan untuk proses pembentukan kerabang telur (Dijkslag *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021). Ayam komersial memiliki efisiensi penyerapan kalsium tinggi sehingga mempunyai kerabang yang kuat (Ketta dan Tumová, 2018). Kekuatan kerabang telur tidak berubah selama penyimpanan telur (Guyot *et al.*, 2016), dan pada akhir produksi kerabang telur menjadi lebih rapuh (Nys *et al.*, 2018). Telur yang kerabangnya kuat lebih tahan dari keretakan.



Warna kerabang ayam *Hy-Line Brown* ($13,90 \pm 0,05$) secara signifikan lebih tinggi dibandingkan ayam Sentul ($8,62 \pm 0,05$). Hal tersebut diduga karena ayam komersial telah melalui program seleksi genetik intensif sehingga menunjukkan keseragaman warna yang tinggi ke arah cokelat. Seleksi genetik intensif ini menghasilkan populasi ayam yang memiliki homozigosis genetik tinggi untuk sifat-sifat yang diinginkan, termasuk gen yang mengontrol produksi pigmen, sehingga fenotip yang dihasilkan menjadi sangat seragam. Sebaliknya ayam lokal menampilkan keanekaragaman warna yang lebih luas mulai dari putih hingga krem. Angka yang lebih tinggi menunjukkan warna yang lebih gelap atau lebih intens. Perini *et al.* (2024) menyatakan bahwa warna kerabang telur ayam merupakan karakteristik yang merefleksikan interaksi antara faktor genetik, fisiologis, dan lingkungan. Pembentukan warna kerabang telur adalah proses fisiologis yang terjadi pada tahap akhir pembentukan telur di dalam uterus ayam. Menurut Mori *et al.* (2020) warna kerabang ditentukan oleh jenis dan jumlah pigmen yang didepositkan pada lapisan terluar kerabang dan kutikula. Protoporfirin adalah pigmen yang memberikan warna cokelat pada

kerabang telur. Menurut Samiullah *et al.* (2015) faktor non-genetik, seperti umur ayam, nutrisi, dan kondisi stres, tidak mengubah warna dasar, tetapi sangat berpengaruh terhadap intensitas dan konsistensi warnanya. Penurunan intensitas warna seiring pertambahan umur dapat berfungsi sebagai penanda visual bagi peternak untuk memantau kesehatan ayam dan memprediksi penurunan kualitas kerabang.

B. Polimorfisme gen *GnRH*

Single Nucleotide Polymorphism (SNP) adalah variasi genetik yang paling umum ditemukan pada organisme. Variasi genetik terjadi ketika satu nukleotida (yaitu A, T, C, atau G) pada suatu posisi spesifik dalam genom berbeda antara individu dalam satu spesies. Para peneliti menggunakan SNP untuk mengidentifikasi gen yang terkait dengan sifat-sifat yang diinginkan, seperti laju pertumbuhan cepat, produksi telur tinggi, atau ketahanan terhadap penyakit. Volkova *et al.* (2024) menyatakan bahwa SNP dan gen kandidat yang ditemukan pada ternak dapat berfungsi sebagai penanda genetik untuk karakteristik yang diamati. Seleksi genetik dapat dilakukan lebih cepat dan efisien setelah mengetahui SNP yang terkait dengan sifat-sifat unggul sehingga mempercepat program pemuliaan.

Single Nucleotide Polymorphism (SNP) pada ayam Sentul teridentifikasi setelah dibandingkan dengan database genetik ayam dari GenBank NCBI. GenBank berfungsi sebagai repositori sentral bagi para ilmuwan untuk menyimpan, mengakses, dan menganalisis data genetik. Database ini menyimpan jutaan urutan nukleotida (DNA dan RNA) dan protein dari berbagai organisme di seluruh dunia. Nomor akses GenBank menjadi referensi standar untuk urutan gen. GenBank NCBI dikelola oleh *National Center for Biotechnology Information* (NCBI) di Amerika Serikat. Data yang didapatkan dari penelitian kemudian dibandingkan dengan data dari GenBank. Data hasil sekruensi dapat dibuat grafik elektroforegram ditandai dengan warna berbeda untuk tiap basa nitrogen, yakni hijau untuk nukleotida A (Adenin), hitam untuk nukleotida G (Guanin), biru untuk nukleotida C (Sitosin), dan merah untuk nukleotida T (Timin) (Ismoyowati *et al.* 2018).

Polimorfisme gen *GnRH* dalam penelitian ini diidentifikasi melalui sekruensi DNA dari ayam komersial (*Hy-Line Brown*) dan lokal (Sentul) masing-masing 100 produk PCR. Analisis sekruensi menunjukkan ada tiga *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP) pada ayam Sentul, sedangkan pada sampel ayam *Hy-Line Brown* tampak identik dan tidak menunjukkan adanya variasi genetik pada semua individu yang diuji. Keseragaman genetik pada ayam

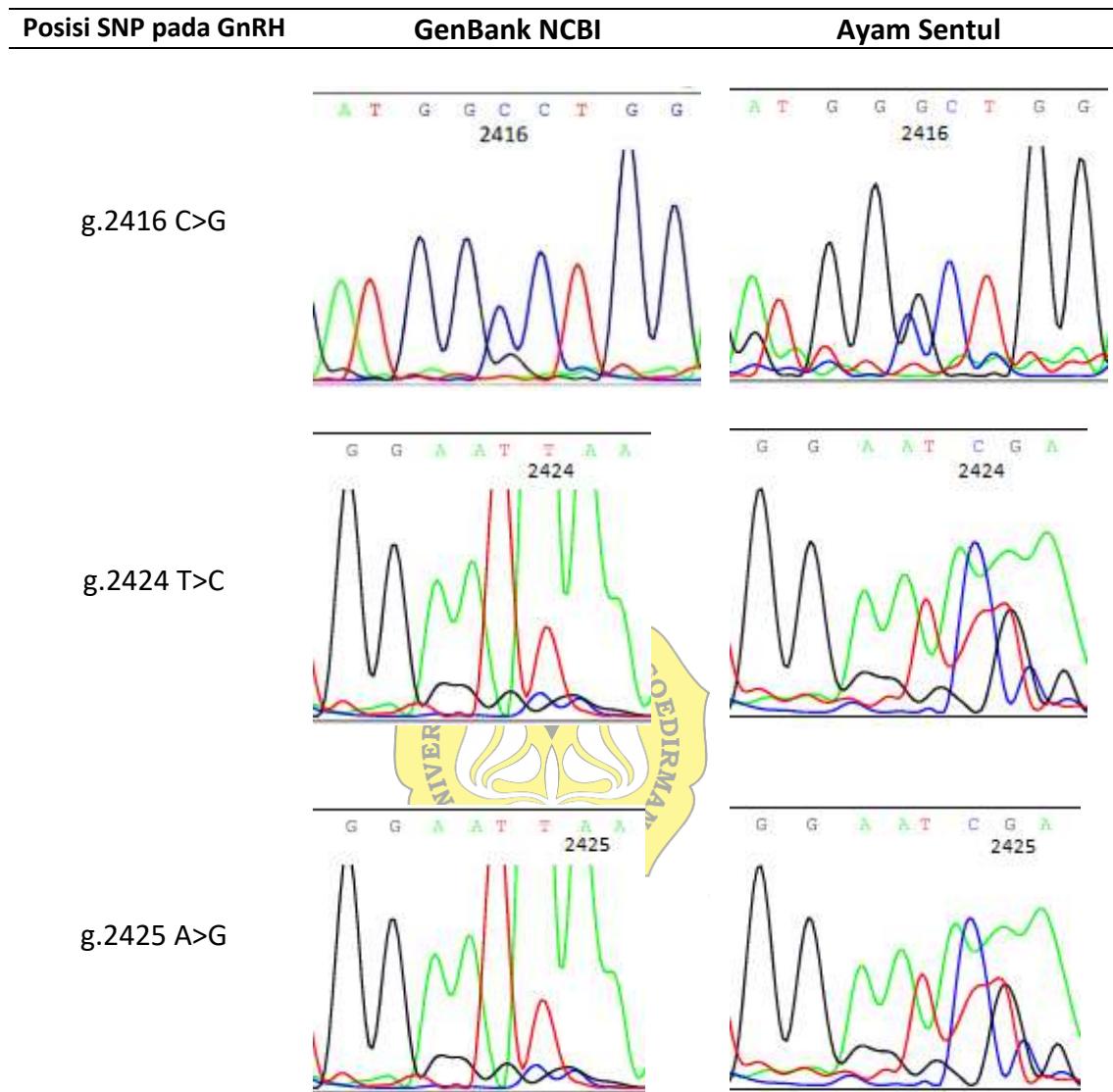
Hy-Line Brown diduga karena adanya seleksi genetik secara intensif yang dilakukan untuk mendapatkan produksi telur yang tinggi. Menurut Khan (2008), ayam komersial secara genetik diseleksi ketat untuk menghasilkan produksi telur tinggi melebihi 90% pada puncak produksi sehingga didapatkan mutu genetik yang lebih seragam.

Tiga SNP yang terdeteksi pada sekuens gen *GnRH* ayam Sentul yang disekuensing yaitu g.2416 C>G, g.2424 T>C, dan g.2425 A>G. Setiap SNP memperlihatkan dua varian genotipik yang berbeda, yaitu: 1) SNP g.2416 C>G menghasilkan genotipe heterozigot CG dan homozigot CC, 2) SNP g.2424 T>C teridentifikasi hanya dalam bentuk homozigot, yaitu TT dan CC, sedangkan 3) SNP g.2425 A>G menghasilkan genotipe homozigot AA dan homozigot GG. Substitusi nukleotida ini menunjukkan perbedaan potensi genetik antara kedua ras ayam yang diduga memiliki kaitan dengan karakteristik reproduksi, efisiensi produksi telur, atau regulasi hormonal. Perubahan genetik seperti g.2416 C>G, g.2424 T>C, dan g.2425 A>G adalah contoh spesifik dari SNP. Saifullah *et al.* (2023) menyatakan variasi alel diantaranya disebabkan oleh mutasi sehingga menimbulkan perubahan genetik yang mempengaruhi sifat fenotip. Mutasi dapat mengubah sekuens protein yang dihasilkan sehingga dapat mempengaruhi karakteristik yang diamati.

Ayam *Hy-Line Brown* dikenal sebagai ayam petelur komersial dengan tingkat produksi telur yang tinggi. Ayam ini merupakan jenis ayam petelur yang diperoleh melalui proses seleksi genetik (Hy-Line International, 2024). Ayam Sentul sebagai ras lokal menunjukkan pola produksi telur yang lebih rendah. Secara genetik ayam Sentul memiliki tingkat variasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan ayam komersial (Ismoyowati *et al.*, 2022). Variasi genetik pada ayam Sentul terbukti dengan teridentifikasinya tiga SNP pada sekuens gen *GnRH* yang disekuensing yaitu g.2416 C>G, g.2424 T>C, dan g.2425 A>G (Gambar 2).

Huruf 'g' pada Gambar 2 menunjukkan genomik yaitu lokasi di dalam seluruh rangkaian DNA suatu organisme. Angka (2416, 2424, 2425) menunjukkan posisi spesifik dari SNP pada urutan genom. Ini adalah nomor urut nukleotida (basis DNA) tempat perubahan terjadi. Misalnya, g.2416 berarti perubahan terjadi pada nukleotida ke-2416 pada sekuens genom. Perubahan nukleotida (C>G, T>C, A>G) menjelaskan jenis perubahan yang terjadi pada posisi SNP tersebut. Huruf sebelum tanda ">" (C, T, A) menunjukkan nukleotida asli atau referensi yang seharusnya ada pada posisi tersebut. Huruf setelah tanda ">" (G, C, G) menunjukkan nukleotida baru atau varian yang ditemukan pada posisi tersebut. C, T, A, G adalah singkatan untuk empat basa nitrogen yang membentuk DNA

yaitu Sitosin (C), Timin (T), Adenin (A), dan Guanin (G). Contoh kode g.2416 C>G artinya pada posisi ke-2416 di genomik ayam Sentul, nukleotida aslinya adalah Sitosin (C), tetapi telah terjadi perubahan atau polimorfisme menjadi Guanin (G).



Gambar 2. Identifikasi SNP gen GnRH pada ayam Sentul berdasarkan elektroforegram

Gonadotropin Releasing Hormone (GnRH) memiliki peran penting dalam mengatur siklus reproduksi dan siklus produksi telur pada unggas. Polimorfisme gen *GnRH* pada ayam petelur berhubungan dengan karakteristik produksi telur. *GnRH* bekerja dengan merangsang sel gonadotrop di hipofisis anterior untuk mensekresikan *Follicle-Stimulating Hormone (FSH)* dan *Luteinizing Hormone (LH)*. Hormon-hormon gonadotropin ini kemudian bekerja langsung pada ovarium merangsang pertumbuhan dan perkembangan serta meningkatkan reseptor LH pada folikel. Ekspresi dan sekresi *GnRH* sebagai respons

terhadap lama pencahayaan menentukan ayam mencapai dewasa kelamin dan bertelur pertama kali (Bhattacharya *et al.*, 2019). Estrogen dan progesteron yang diproduksi ovarium memberikan umpan balik negatif dan positif pada ekspresi dan sekresi *GnRH* dalam mengatur siklus ovulasi (Dickens *et al.*, 2011). Stres (panas, keramaian, nutrisi buruk) dapat menghambat ekspresi dan sekresi *GnRH* melalui peningkatan glukokortikoid dan aktivasi *Corticotropin-Releasing Hormone* (Xie *et al.*, 2024). Sekresi *GnRH* yang pulsatif dan siklik diperlukan untuk memicu puncak LH setiap hari atau setiap 24-26 jam pada ayam memungkinkan ovulasi harian. Gangguan pada pensinyalan *GnRH* (misal, akibat stres) menyebabkan penundaan ovulasi, jeda bertelur, dan penurunan intensitas (Bain *et al.*, 2016). *GnRH* tidak secara langsung mempengaruhi kualitas telur, namun pengaruhnya secara tidak langsung melalui regulasi hormon gonadotropin (FSH, LH) dan steroid ovarium (estrogen, progesteron). Gangguan *GnRH* dapat menurunkan estrogen sehingga berpotensi mempengaruhi ukuran telur. Defisiensi estrogen akibat gangguan *GnRH* dapat berkontribusi pada penurunan kualitas kerabang (Sun *et al.*, 2001).

Mutasi pada gen *GnRH* dapat mempengaruhi ekspresi dan fungsionalitasnya sehingga menyebabkan perbedaan dalam sensitivitas terhadap hormon tertentu dan kematangan seksual, yang pada akhirnya mempengaruhi tingkat produksi telur (Dickens *et al.*, 2011). Perubahan pada wilayah gen ini dapat menyebabkan peningkatan atau penurunan efisiensi pengikatan protein regulator, yang secara langsung mempengaruhi tingkat ekspresi *GnRH*. Selain itu, perubahan dalam sekuens nukleotida berpotensi memodifikasi bentuk protein atau interaksi hormon-reseptor, yang pada akhirnya dapat mengakibatkan variasi pada produksi dan kualitas telur individu ayam. Menurut El-Sabrout *et al.* (2022) kemampuan ayam untuk mempertahankan tingkat produksi telur yang tinggi dalam periode produksi yang panjang dipengaruhi oleh stabilitas gen *GnRH*. Secara keseluruhan, fungsi optimal gen *GnRH* dan sistem pensinalannya merupakan prasyarat untuk mencapai potensi genetik ayam dalam hal jumlah telur yang dihasilkan selama siklus produksi. Ayam dengan profil pensinyalan *GnRH* yang efisien cenderung memiliki produksi kumulatif yang lebih tinggi. Penelitian yang dilakukan oleh Gao *et al.* (2020) mengenai polimorfisme gen *GnRH* pada angsa mengidentifikasi 46 SNP yang terkait dengan sifat produksi telur, termasuk jumlah telur, tingkat produksi, dan kualitas telur. Zhao *et al.* (2021), berhasil mengidentifikasi 148 SNP yang berkaitan dengan karakteristik jumlah telur. SNP tersebut dikonfirmasi memiliki peran dalam pengaturan jalur hormonal, perkembangan folikel,

serta fungsi sistem reproduksi. Penelitian tersebut mendukung hipotesis bahwa variasi genetik pada gen *GnRH* berkontribusi terhadap perbedaan tingkat produksi telur pada berbagai spesies unggas.

Keragaman genetik dalam populasi dihitung berdasarkan taksiran heterozigositas dalam populasi sampel dan taksiran heterozigositas rata-rata. Perhitungan berdasarkan frekuensi alel yang diperoleh dari tiga macam lokus yaitu SNP g.2416, SNP g.2424 dan SNP g.2425. Ayam *Hy-Line* tidak memiliki keragaman genetik karena dalam masing-masing lokus hanya diperoleh satu jenis alel, sehingga heterozigositasnya bernilai nol persen. Ayam Sentul diperoleh nilai keragaman heterozigositas pada lokus SNP g.2416 C>G sebesar 0,289, lokus SNP g.2424 T>C sebesar 0,455 dan SNP g.2425 A>G sebesar 0,455. Berdasarkan hasil nilai heterositas pada ketiga lokus tersebut diperoleh nilai rata-rata heterozigositas (\hat{H}_e) sebesar 0,3996. Nilai rata-rata heterozigositas pada ketiga lokus SNP ayam Sentul ($\hat{H}_e = 0,3996$) tersebut menunjukkan pada ayam Sentul mempunyai keragaman genetik pada lokus tunggal yang cukup tinggi. Riztyan *et al.* (2011) menyatakan SNP pada ayam lokal Indonesia mempunyai nilai H_e rata-rata populasi pada kisaran 0,224–0,263. Pratama *et al.* (2023) menyatakan bahwa nilai heterozigositas GH|Msp1 ayam Sentul adalah $H_0 = 0,228$ dan $H_e = 0,213$, sehingga nilai $\hat{H}_e = 0,3996$ yang diperoleh pada penelitian ini termasuk di sisi atas rentang tipikal yang dilaporkan untuk marker SNP pada ayam lokal.

C. Distribusi Alel dan Genotipe

Single Nucleotide Polymorphism (SNP) g.2416 C>G

Analisis distribusi alel dan genotipe untuk SNP g.2416 C>G pada ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul menunjukkan perbedaan yang mencolok (Tabel 2). Ayam *Hy-Line Brown* menunjukkan keseragaman genetik sempurna, dengan semua individu memiliki genotip homozigot CC (Cytosine-Cytosine). Tidak ditemukan adanya variasi, baik pada *observed genotype* maupun *expected genotype*, sehingga frekuensi alel yang diperoleh adalah 1,00 untuk C dan 0,00 untuk G. Nilai *chi-square* sebesar 0 menunjukkan kesesuaian sempurna dengan keseimbangan Hardy-Weinberg.

Pengamatan ayam Sentul terjadi sebaliknya yaitu menunjukkan keanekaragaman genetik. Keragaman didapatkan dari dua kelompok genotipe yang teridentifikasi yaitu CC dan CG, dan tidak ditemukan adanya individu homozigot GG. Menurut De Meeûs (2018)

Tabel 2. Distribusi alelik dan genotipe pada ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul untuk SNP g.2416 C>G

| Galur Ayam | N | Frekuensi Genotipe | | | Frekuensi Alel | | χ^2 | |
|----------------------|-----------------|--------------------|------|----|----------------|-------|----------|------|
| | | CC | CG | GG | C | G | | |
| <i>Hy-Line Brown</i> | <i>Observed</i> | 100 | 100 | 0 | 0 | 1,000 | 0,000 | 0,00 |
| | <i>Expected</i> | 100 | 100 | 0 | 0 | | | |
| Sentul | <i>Observed</i> | 100 | 65 | 35 | 0 | 0,825 | 0,175 | 4,37 |
| | <i>Expected</i> | 100 | 68 | 29 | 3 | | | |
| | | 0,65 | 0,35 | 0 | | | | |

tidak ditemukannya alel tertentu pada suatu individu dapat disebabkan oleh *null alleles* atau *allelic dropout* (kesalahan *genotyping*), struktur subpopulasi (*Wahlund effect*), serta *inbreeding* atau seleksi kuat. Callen *et al.* (1993) menyatakan *null alleles* adalah alel yang tidak terdeteksi selama proses genotyping karena adanya mutasi pada daerah pengikatan primer sehingga PCR gagal mengamplifikasi alel tersebut. Akibatnya, individu yang sebenarnya heterozigot (memiliki dua alel berbeda) dapat terlihat sebagai homozigot karena hanya satu alel yang teramplifikasi. Pompanon *et al.* (2005) menyatakan *allelic dropout* adalah kondisi ketika salah satu alel gagal teramplifikasi, terutama bila DNA rusak, berkualitas rendah, atau jumlah DNA sangat sedikit. Wahlund (1928) menyatakan *Wahlund effect* adalah penurunan heterozigositas yang disebabkan oleh adanya struktur subpopulasi dalam suatu populasi yang tampak tunggal. Artinya, populasi yang dianggap satu sebenarnya terdiri dari beberapa subpopulasi dengan frekuensi alel berbeda dan perkawinan lebih sering terjadi di dalam subpopulasi masing-masing. Falconer dan Mackay (1996) menyatakan *inbreeding* merupakan perkawinan antar individu yang memiliki hubungan kekerabatan dekat, menyebabkan peningkatan peluang alel identik dari nenek moyang yang sama. Menyebabkan peningkatan homozigositas dan penurunan heterozigositas, serta dapat menimbulkan *inbreeding depression* (penurunan vitalitas dan kesuburan akibat ekspresi alel resesif yang merugikan). Charlesworth dan Charlesworth (2010) menyatakan seleksi kuat dapat mengubah frekuensi alel secara cepat karena hanya individu dengan genotipe tertentu yang memiliki peluang bertahan dan bereproduksi. Akibatnya, terjadi penurunan variasi genetik dan peningkatan frekuensi alel menguntungkan.

Distribusi genotipe pada ayam Sentul yang diamati adalah 65 individu CC dan 35 individu CG. Nilai *observed genotype* ini sedikit berbeda dengan nilai yang diharapkan pada *expected genotype*, yaitu 68 CC, 29 CG, dan 3 GG. Frekuensi alel yang diperoleh adalah 0,825 untuk C dan 0,175 untuk G. Nilai *chi-square* sebesar 4,37 menunjukkan tidak ada penyimpangan dari keseimbangan Hardy-Weinberg.

Tidak adanya variasi SNP pada ayam *Hy-Line Brown* menunjukkan tingkat keseragaman genetik yang tinggi. Hal tersebut diduga karena pengaruh dari proses seleksi yang bertujuan untuk memaksimalkan efisiensi produksi telur dan stabilitas reproduksi. Ras ayam petelur komersial mengalami seleksi genetik yang intensif guna mempertahankan karakteristik yang paling optimal untuk produksi, sehingga mengakibatkan penurunan keragaman genetik pada gen-gen yang memiliki peran fungsional penting, termasuk *GnRH*, yang berfungsi dalam regulasi hormon reproduksi dan siklus produksi telur. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Kansaku *et al.* (2003) bahwa tekanan seleksi kuat yang mengutamakan performa produksi telur tinggi menyebabkan tingkat polimorfisme genetik yang rendah pada gen-gen utama yang berperan dalam sistem reproduksi. Walaupun keseragaman ini memberikan keuntungan berupa stabilitas fenotipik dan prediktabilitas performa produksi, hal ini juga dapat membatasi potensi respons adaptif populasi tersebut terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Keberadaan genotipe CC dan CG pada ayam Sentul menunjukkan tingkat keragaman genetik lebih tinggi, yang merupakan karakteristik umum pada ras lokal yang mengalami seleksi tidak terarah dan adaptasi terhadap berbagai lingkungan. Xie *et al.* (2024) menyatakan ayam lokal umumnya memiliki keragaman genetik yang lebih luas, memungkinkan daya adaptasi yang lebih baik serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang beragam. Tidak adanya individu dengan genotipe GG dapat mengindikasikan bahwa alel G bersifat langka atau kemungkinan mengalami seleksi negatif dalam populasi ini. Nilai *chi-square* sebesar 4,37 menunjukkan adanya penyimpangan kecil dari keseimbangan Hardy-Weinberg. Menurut Warwick *et al.* (1994) keseimbangan Hardy-Weinberg terjadi jika perkawinan acak suatu populasi dari generasi ke generasi berikutnya tanpa adanya faktor yang dapat mengubah frekuensi gen pada populasi tersebut. Faktor-faktor yang dapat mengubah dan mempengaruhi frekuensi gen dalam suatu populasi yaitu adanya mutasi, seleksi, *random drift*, dan migrasi.

Single Nucleotide Polymorphism (SNP) g.2424 T>C

Tabel 3. Distribusi alelik dan genotipe pada ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul untuk SNP g.2424 T>C

| Galur Ayam | N | Frekuensi Genotipe | | | Frekuensi Alel | | χ^2 | |
|----------------------|-----------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------------------|----------|----------|--------|
| | | TT | TC | CC | T | C | | |
| <i>Hy-Line Brown</i> | <i>Observed</i> | 100 | 100 | 0 | 0 | 1,000 | 0,000 | 0,00 |
| | <i>Expected</i> | 100 | 100 | 0 | 0 | | | |
| Sentul | <i>Observed</i> | 100 | 65 | 0 | 35 | 0,65 | 0,35 | 102,68 |
| | <i>Expected</i> | 100 | 42 | 46 | 12 | | | |
| | | 0,65 | 0 | 0,35 | | | | |

Berdasarkan Tabel 3, SNP g.2424 T>C pada ayam *Hy-Line Brown* juga menunjukkan keseragaman genetik yang sempurna, dengan seluruh individu memiliki genotipe TT. Distribusi genotipe yang teramat dalam populasi Sentul terdiri dari 65 individu dengan genotipe TT dan 35 individu dengan genotipe CC. Distribusi yang diharapkan (*expected genotype*) pada ayam Sentul berdasarkan keseimbangan Hardy-Weinberg adalah 42 individu TT, 46 heterozigot TC, dan 12 individu CC. Frekuensi alel terhitung sebesar 0,65 untuk T dan 0,35 untuk C. Uji *chi-square* menghasilkan nilai sebesar 102,68, nilai ini sangat signifikan dan menunjukkan adanya penyimpangan yang kuat dari frekuensi genotipe yang diharapkan.

Populasi ayam Sentul menunjukkan variasi genetik yang lebih tinggi. Hal ini diduga karena ayam lokal umumnya berasal dari hasil persilangan alami berbagai ras atau populasi liar yang telah beradaptasi di wilayah tertentu. Liu *et al.* (2006) menyatakan proses domestikasi yang terjadi secara bertahap dan tersebar luas menyebabkan keragaman genetik tinggi antar dan dalam populasi ayam lokal. Falconer dan Mackay, (1996) menyatakan variasi genetik alami tetap terjaga pada populasi yang tidak mengalami seleksi buatan (*artificial selection*) secara intensif terhadap sifat tertentu. Dalam populasi dengan tekanan seleksi rendah, alel-alel minoritas tetap dapat bertahan. Hal ini menyebabkan heterozigositas tinggi dan variasi genetik luas. Menurut FAO (2011) tekanan lingkungan yang berbeda memunculkan seleksi alami yang bervariasi antar daerah sehingga meningkatkan keragaman genetik antar populasi. Gen-gen yang berperan dalam ketahanan, reproduksi, atau metabolisme mengalami diferensiasi lokal memperkaya variasi genetik.

Single Nucleotide Polymorphism (SNP) g.2425 A>G

Tabel 4. Distribusi alelik dan genotipe pada ayam *Hy-Line Brown* dan Sentul untuk SNP g.2425 A>G

| Galur Ayam | N | Frekuensi Genotipe | | | Frekuensi Alel | | χ^2 | |
|----------------------|-----------------|--------------------|-----|------|----------------|-------|----------|--------|
| | | AA | AG | GG | A | G | | |
| <i>Hy-Line Brown</i> | <i>Observed</i> | 100 | 100 | 0 | 0 | 1,000 | 0,000 | 0,00 |
| | <i>Expected</i> | 100 | 100 | 0 | 0 | | | |
| Sentul | <i>Observed</i> | 100 | 65 | 0 | 35 | 0,65 | 0,35 | 102,68 |
| | <i>Expected</i> | 100 | 42 | 46 | 12 | | | |
| | | 0,65 | 0 | 0,35 | | | | |

Berdasarkan Tabel 4, SNP g.2425 A>G pada ayam *Hy-Line Brown* menunjukkan keseragaman genetik yang sempurna, dengan seluruh individu memiliki genotipe AA. Ayam Sentul menunjukkan penyimpangan yang cukup besar dari keseimbangan Hardy-Weinberg. Distribusi genotipe yang teramati pada ayam Sentul hanya terdiri dari homozigot (65 AA dan 35 GG) tanpa adanya heterozigot, sangat berbeda dari frekuensi yang diharapkan (42 AA, 46 AG, dan 12 GG). Nilai *chi-square* yang tinggi (102,68) mengindikasikan bahwa seleksi yang tidak terkontrol diduga mempengaruhi distribusi alel pada lokus ini. Salah satu interpretasi yang mungkin adalah distribusi genotipe pada populasi ayam Sentul ini mencerminkan respons adaptasi lokal dalam jangka waktu yang panjang yang telah mengubah frekuensi alel, sehingga menyebabkan penurunan jumlah individu heterozigot dalam populasi ini. Menurut Hoban *et al.* (2016) seleksi pada alel yang memberi keuntungan lokal akan menaikkan frekuensi alel tersebut sampai mendekati fiksasi; saat satu alel menjadi sangat dominan dan frekuensi heterozigot turun. Hal ini merupakan konsekuensi langsung dari perubahan frekuensi alel karena seleksi. Menurut Holsinger dan Weir (2009) efek demografi (*bottleneck*, ukuran efektif populasi kecil, *inbreeding*) juga menurunkan heterozigositas lewat *genetic drift* dan kenaikan koefisien inbreeding. *Bottleneck effect* adalah penurunan mendadak ukuran populasi akibat bencana, penyakit, atau perburuan, yang menyebabkan hilangnya sebagian besar variasi genetik. Akibatnya, frekuensi alel dapat berubah secara acak, dan keragaman genetik menurun drastis (Nei *et al.*, 1975). *Genetic drift* adalah perubahan acak frekuensi alel dari generasi ke generasi, bukan karena seleksi alam, tetapi karena faktor kebetulan. Kejadian

ini lebih berpengaruh pada populasi kecil yang menyebabkan alel langka menghilang atau alel tertentu menjadi tetap (Hartl & Clark, 2007).

Hasil analisis SNP ini menunjukkan pola yang sejalan dengan SNP yang telah dijelaskan sebelumnya. Ayam *Hy-Line Brown* memperlihatkan keseragaman genotipik yang sempurna, tanpa adanya polimorfisme, yang mencerminkan tekanan seleksi yang kuat dalam program pemuliaan komersial. Ayam Sentul menunjukkan variasi genetik yang signifikan dengan frekuensi genotipe yang menyimpang dari keseimbangan Hardy-Weinberg. Distribusi genotipe dalam populasi ayam lokal ini memperlihatkan ketidakseimbangan yang mencolok antara homozigot, sebagaimana dibuktikan oleh nilai *chi-square* yang tinggi. Pola konsisten yang teramat di antara berbagai SNP dalam gen *GnRH* semakin mempertegas kontras antara homogenitas genetik yang ditemukan pada ras komersial dan keanekaragaman genetik yang lebih tinggi dalam populasi ayam lokal.

D. Asosiasi Gen *GnRH* dengan Produksi dan Kualitas Telur

Analisis regresi dan korelasi digunakan untuk mengetahui asosiasi atau hubungan antara SNP g.2416 C>G, SNP g.2424 T>C, SNP g.2425 A>G dengan produksi dan kualitas telur pada ayam *Hy-Line Brown* dan ayam Sentul. Parameter yang diamati adalah produksi telur selama 8 minggu (minggu ke 24-31), bobot telur, warna kerabang, kekuatan kerabang, warna kuning telur, bobot kuning telur, bobot putih telur, HU, bobot kerabang, dan ketebalan kerabang. Berdasarkan identifikasi, seluruh individu sampel *Hy-Line Brown* dalam bentuk homozigot (CC) pada lokus SNP g.2416, bentuk homosigot (TT) pada lokus SNP g.2424 dan bentuk homosigot (AA) pada lokus SNP g.2425. Tidak terdeteksi adanya polimorfisme pada lokus SNP ayam *Hy-Line Brown*. Analisis efek alel antara kelompok genotipe tidak dapat dilakukan karena tidak adanya variasi antar kelompok genotipe pada ayam *Hy-Line Brown*.

Ketidakmampuan untuk mendeteksi asosiasi antara SNP g.2416 C>G, SNP g.2424 T>C dan SNP g.2425 A>G terhadap parameter produksi dan kualitas telur pada ayam *Hy-Line Brown* diduga karena kurangnya variabilitas genetik pada lokus ini. Keseragaman genetik ini mencerminkan proses seleksi artifisial yang intensif dan terarah dalam program pemuliaan ayam komersial yang bertujuan memaksimalkan performa produksi telur. Pada garis keturunan komersial yang telah mengalami seleksi tinggi, seperti *Hy-Line Brown*, banyak gen utama termasuk gen yang mengontrol fungsi reproduksi dan sifat-sifat terkait kualitas telur menjadi terfiksasi akibat seleksi. Kondisi tersebut mengakibatkan variasi

genetik yang diperlukan untuk melakukan analisis asosiasi genotipe-fenotipe yang bermakna menjadi tidak tersedia. Kansaku *et al.* (2003) menyatakan bahwa tekanan seleksi kuat yang mengutamakan performa produksi telur tinggi menyebabkan tingkat polimorfisme genetik yang rendah pada gen-gen utama yang berperan dalam sistem reproduksi.

Asosiasi Antara SNP g.2416 C>G dengan Produksi dan Kualitas Telur

Tabel 5. Analisis asosiasi antara SNP g.2416 C>G dengan produksi dan kualitas telur ayam Sentul

| Variabel | Genotipe | | | Taraf Signifikansi Uji | |
|------------------------------------|----------|-------|----|------------------------|--------------|
| | CC | CG | GG | Korelasi | Regresi |
| Produksi Telur Selama 8 minggu (%) | 67,25 | 69,34 | 0 | 0,022 | 0,022 |
| Bobot Telur (g) | 50,61 | 50,92 | 0 | 0,406 | 0,407 |
| Bobot Putih Telur (g) | 26,04 | 26,47 | 0 | 0,235 | 0,236 |
| Bobot Kuning Telur (g) | 17,65 | 17,55 | 0 | 0,746 | 0,745 |
| Haught Unit | 86,79 | 86,56 | 0 | 0,841 | 0,841 |
| Warna Kuning Telur (skala) | 8,64 | 8,60 | 0 | 0,757 | 0,749 |
| Bobot Kerabang (g) | 6,82 | 6,83 | 0 | 0,915 | 0,902 |
| Ketebalan Kerabang (mm) | 0,37 | 0,38 | 0 | 0,024 | 0,028 |
| Kekuatan Kerabang (kgf) | 0,34 | 0,34 | 0 | 0,958 | 0,901 |
| Warna Kerabang (skala) | 8,64 | 8,60 | 0 | 0,757 | 0,749 |

Analisis asosiasi antara SNP g.2416 C>G, SNP g.2424 T>C, SNP g.2425 A>G juga dilakukan pada ayam Sentul dengan produksi dan kualitas telur. Parameter yang diamati adalah produksi telur selama 8 minggu, bobot telur, bobot putih telur, bobot kuning telur, haugt unit, warna kuning telur, bobot kerabang, ketebalan kerabang, kekuatan kerabang, dan warna kerabang. Analisis asosiasi yang dilakukan pada ayam Sentul menunjukkan bahwa SNP g.2416 C>G secara umum tidak memiliki asosiasi yang signifikan terhadap produksi dan kualitas telur (Tabel 5) kecuali pada produksi telur dan ketebalan kerabang. Hal ini terlihat dari nilai signifikansi asosiasi yang selalu lebih besar dari 0,05 ($P>0,05$) untuk semua variabel yang diukur kecuali pada produksi telur dan ketebalan kerabang. Ini berarti secara umum tidak ada perbedaan statistik yang signifikan antara genotipe CC dan CG pada sifat-sifat yang diamati. Hasil analisis deskriptif menunjukkan bahwa telur dari individu dengan genotipe homozigot CC dan heterozigot CG memiliki kualitas yang relatif sama.

Hasil uji statistik menunjukkan delapan dari sepuluh (80%) parameter yang diamati melebihi ambang batas taraf nyata 0,05. Hal ini artinya bahwa meskipun terdapat tren

peningkatan produksi dan kualitas telur pada genotipe CG, asosiasi tersebut secara statistik tidak berpengaruh nyata dan kontribusi SNP terhadap variasi kualitas telur sangat kecil. Artinya bahwa meskipun terdapat kecenderungan genotipe heterozigot CG berasosiasi dengan peningkatan produksi telur dan kualitas telur, asosiasi yang diperoleh lemah karena nilai peningkatannya kecil. Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun genotipe CG memiliki keunggulan deskriptif dalam peningkatan produksi dan kualitas telur, efek SNP ini tidak memiliki dampak yang berarti secara statistik.

Hasil identifikasi ini dapat dikaitkan dengan sifat multifaktorial dari kualitas telur yang dipengaruhi banyak faktor genetik dan interaksi lingkungan, sehingga mengurangi dampak dari satu marka genetik tunggal. Zhang *et al.* (2015) menyatakan bahwa beberapa SNP pada gen *ovoinhibitor* pada ayam Jinghai Yellow memiliki asosiasi signifikan dengan karakteristik kualitas telur, namun SNP lain pada gen yang sama tidak menunjukkan asosiasi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh SNP terhadap sifat genetik sangat spesifik tergantung pada jenis gen, lokasinya, serta interaksi dengan gen lain (epistasis) dan faktor lingkungan.

Dalam hal ayam Sentul, hasil ini bisa disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, SNP g.2416 C>G mungkin bukan merupakan *marker* kausal yang secara langsung mempengaruhi produksi atau kualitas telur. SNP ini diduga hanya merupakan *marker* yang berlokasi dekat dengan gen lain yang lebih berpengaruh, namun jaraknya terlalu jauh sehingga tidak menunjukkan asosiasi yang kuat. Kedua, ukuran sampel yang digunakan dalam penelitian mungkin belum cukup besar untuk mendeteksi perbedaan yang kecil. Semakin besar ukuran sampel, semakin tinggi kemungkinan untuk menemukan asosiasi yang signifikan jika memang ada. Studi dengan jumlah sampel yang lebih besar, pemetaan fenotipe yang lebih rinci, serta analisis multilokus mungkin diperlukan untuk lebih memahami karakteristik genetik yang mendasari sifat dan kualitas telur ayam Sentul. Menurut Nei dan Kumar (2000), dalam studi genetik ukuran sampel menentukan variasi genetik langka dapat terdeteksi. Sampel kecil bisa membuat alel atau genotipe tertentu tidak muncul sehingga analisis menjadi bias. Hasil ini menunjukkan bahwa SNP g.2416 C>G tidak dapat digunakan sebagai *marker* genetik tunggal untuk seleksi dalam program pemuliaan yang bertujuan meningkatkan sifat-sifat tersebut pada populasi ayam Sentul.

Asosiasi Antara SNP g.2424 T>C dengan Produksi dan Kualitas Telur

Tabel 6. Analisis asosiasi antara SNP g.2424 T>C dengan produksi dan kualitas telur ayam Sentul

| Variabel | Genotipe | | | Tarat Signifikansi Uji | |
|------------------------------------|----------|----|-------|------------------------|--------------|
| | TT | TC | CC | Korelasi | Regresi |
| Produksi Telur Selama 8 minggu (%) | 67,86 | 0 | 68,21 | 0,697 | 0,698 |
| Bobot Telur (g) | 50,85 | 0 | 50,49 | 0,336 | 0,336 |
| Bobot Putih Telur (g) | 26,53 | 0 | 25,56 | 0,007 | 0,007 |
| Bobot Kuning Telur (g) | 17,66 | 0 | 17,54 | 0,690 | 0,691 |
| Haught Unit | 85,97 | 0 | 88,08 | 0,058 | 0,057 |
| Warna Kuning Telur (skala) | 8,63 | 0 | 8,62 | 0,941 | 0,953 |
| Bobot Kerabang (g) | 6,91 | 0 | 6,67 | 0,002 | 0,002 |
| Ketebalan Kerabang (mm) | 0,38 | 0 | 0,36 | 0,000 | 0,000 |
| Kekuatan Kerabang (kgf) | 0,35 | 0 | 0,33 | 0,217 | 0,235 |
| Warna Kerabang (skala) | 8,63 | 0 | 8,62 | 0,941 | 0,953 |

Berdasarkan data pada Tabel 6, analisis asosiasi antara *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP) g.2424 T>C dengan produksi telur dan kualitas telur ayam Sentul menunjukkan hasil yang beragam. Tingkat signifikansi yang lebih besar dari 0,05 ($P>0,05$) menunjukkan tidak adanya hubungan yang signifikan, sedangkan yang lebih kecil dari 0,05 ($P<0,05$) menunjukkan adanya hubungan signifikan. Alel T dan alel C mempunyai hubungan sangat nyata ($P<0,01$) terhadap bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang. Kondisi ini menunjukkan bahwa alel T dan C mempengaruhi banyak karakter. Etches (1998) menyatakan satu alel tidak hanya menentukan satu sifat tunggal, tetapi juga dapat memberikan pengaruh pada beberapa sifat yang berbeda. Kondisi ini disebut pleiotropi yaitu ketika satu gen memengaruhi banyak karakter fenotipik.

Secara umum, SNP g.2424 T>C tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap tujuh dari sepuluh (70%) parameter kecuali pada bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang. Berdasarkan rata-rata setiap genotipe, perbedaan nyata ditemukan pada bobot putih telur (TT 26,53 g vs CC 25,56 g; $P=0,007$), bobot kerabang (TT 6,91 g vs CC 6,67 g; $P=0,002$) dan ketebalan kerabang (TT 0,38 mm vs CC 0,36 mm; $P=0,000$). Karakteristik lain tidak menunjukkan perbedaan, yaitu produksi telur selama 8 minggu, bobot telur total, bobot kuning telur, warna kuning telur, kekuatan kerabang, serta warna kerabang tidak berbeda nyata antara TT dan CC (semua $P>0,05$). Alel T tampak terkait dengan kerabang yaitu pada ketebalan maupun beratnya, sedangkan alel C cenderung terkait dengan nilai HU yang sedikit lebih tinggi (meskipun belum signifikan). Tidak adanya individu TC

menunjukkan sampel tidak seimbang atau tidak sesuai dengan keseimbangan Hardy-Weinberg.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara genotipe TT dan CC dalam produksi telur selama 8 minggu ($P>0,05$). Tidak adanya asosiasi pada produksi telur 8 minggu diduga karena performa produksi sangat poligenik dan rentan efek lingkungan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi pada lokus tertentu dalam gen *GnRH* hanya memberikan kontribusi yang sangat kecil terhadap variasi fenotipik keseluruhan dari kualitas telur. Menurut Du *et al.* (2020) bahwa produksi telur dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk genetik, lingkungan, dan manajemen. Identifikasi ini konsisten dengan konsep bahwa kualitas telur merupakan sifat kompleks dan poligenik yang kemungkinan besar diatur oleh efek aditif atau interaksi dari beberapa lokus genetik, bukan hanya oleh satu SNP tunggal. Perbedaan antara genotipe TT dan CC pada ayam Sentul kemungkinan tertutupi oleh faktor genetik lain serta pengaruh lingkungan yang secara kolektif menentukan kualitas telur. Hal ini sesuai dengan pendapat Schreiweis *et al.* (2006) bahwa beberapa *Quantitative Trait Locus* (QTL) pada kromosom berbeda mempengaruhi berbagai aspek kualitas telur dan produksi telur. Hal ini menunjukkan bahwa banyak lokus berkontribusi (tidak hanya satu). *Quantitative Trait Locus* adalah suatu wilayah DNA yang berkontribusi terhadap sifat kuantitatif yang kompleks dan dipengaruhi oleh beberapa gen (poligenik) serta faktor lingkungan

Hasil analisis menunjukkan bahwa SNP g.2424 T>C memiliki pengaruh yang signifikan terhadap bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ayam dengan genotipe CC memiliki bobot kerabang yang lebih rendah dibandingkan dengan ayam dengan genotipe TT ($P<0,05$). Identifikasi tersebut sesuai dengan pendapat Chen *et al.* (2024) bahwa SNP pada gen tertentu dapat mempengaruhi kualitas telur. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa ayam dengan genotipe CC memiliki ketebalan kerabang yang lebih rendah dibandingkan dengan ayam dengan genotipe TT ($P<0,05$). Ketebalan kerabang yang lebih rendah dapat mempengaruhi kekuatan kerabang dan meningkatkan risiko kerusakan telur (Hunton, 2005).

Studi asosiasi genom-skala luas (*Genome-Wide Association Study-GWAS*) pada ayam menunjukkan sifat kualitas kerabang dipengaruhi jalur kalsifikasi dan protein matriks kerabang. Gen yang terlibat dalam pengikatan ion kalsium dan pembentukan pori-pori serta lapisan efektif kerabang berkorelasi dengan ketebalan dan kekuatan kerabang

(Zhang *et al.*, 2024). Genotipe TT memiliki kerabang lebih tebal sesuai dengan literatur bahwa ketebalan kerabang berasosiasi dengan kekuatan dan kontribusi bobot kerabang terhadap bobot telur total. Wang *et al.* (2024) menyatakan bahwa sifat produksi dan kualitas telur memiliki arsitektur poligenik yang kompleks sehingga sebuah SNP tunggal hanya bisa menjelaskan proporsi variansi yang kecil. Adanya signifikansi pada kerabang pada penelitian ini diduga bagian dari jaringan *marker* yang lebih luas, sedangkan sifat seperti produksi telur sering kali memerlukan pendekatan genomik komprehensif untuk mendeteksi efek yang muncul.

Asosiasi yang signifikan SNP g.2424 T>C dengan bobot putih telur, ketebalan dan bobot kerabang telur pada alel T berpotensi menjadi kandidat *marker* untuk peningkatan kualitas telur dan kerabang telur pada ayam Sentul agar telur tidak mudah retak. Uji interaksi antara genetik dengan lingkungan diperlukan pada tujuan tersebut agar mendapatkan hasil yang lebih baik. Kecenderungan HU lebih tinggi pada CC mengisyaratkan potensi yang perlu dipertimbangkan dalam seleksi. Zhang *et al.* (2024) menyatakan bahwa terdapat korelasi negatif antara rasio kuning telur dan ukuran telur dengan HU, sehingga seleksi tunggal pada kerabang perlu memantau HU.

Asosiasi Antara SNP g.2425 A>G dengan Produksi dan Kualitas Telur

Tabel 7. Analisis asosiasi antara SNP SNP g.2425 A>G dengan produksi dan kualitas telur ayam Sentul

| Variabel | Genotipe | | | Tarat Signifikansi Uji | |
|------------------------------------|----------|----|-------|------------------------|--------------|
| | AA | AG | GG | Korelasi | Regresi |
| Produksi Telur Selama 8 minggu (%) | 65,80 | 0 | 72,04 | 0,000 | 0,000 |
| Bobot Telur (g) | 50,77 | 0 | 50,64 | 0,736 | 0,737 |
| Bobot Putih Telur (g) | 26,20 | 0 | 26,17 | 0,939 | 0,938 |
| Bobot Kuning Telur (g) | 17,87 | 0 | 17,15 | 0,016 | 0,016 |
| Haught Unit | 86,37 | 0 | 87,33 | 0,388 | 0,388 |
| Warna Kuning Telur (skala) | 8,64 | 0 | 8,59 | 0,647 | 0,652 |
| Bobot Kerabang (g) | 6,87 | 0 | 6,74 | 0,104 | 0,104 |
| Ketebalan Kerabang (mm) | 0,37 | 0 | 0,37 | 0,743 | 0,770 |
| Kekuatan Kerabang (kgf) | 0,35 | 0 | 0,33 | 0,287 | 0,344 |
| Warna Kerabang (skala) | 8,64 | 0 | 8,59 | 0,647 | 0,652 |

Analisis asosiasi SNP g.2425 A>G (Tabel 7) terhadap kualitas telur secara umum tidak signifikan (berpengaruh tidak nyata) kecuali pada bobot kuning telur, mengindikasikan bahwa genotipe SNP (AA vs. GG) tidak memiliki pengaruh yang substansial terhadap

karakteristik kualitas telur secara kolektif. Analisis asosiasi antara SNP g.2425 A>G dengan produksi telur dan kualitas telur ayam Sentul menunjukkan adanya pengaruh signifikan pada produksi telur dan bobot kuning telur. Parameter lainnya tidak menunjukkan hubungan yang signifikan secara statistik. SNP g.2425 A>G memiliki pengaruh yang signifikan terhadap produksi telur selama 8 minggu dan bobot kuning telur ($P < 0,05$). Hal ini berarti ada perbedaan yang signifikan antara genotipe AA dan GG dalam hal produksi telur dan bobot kuning telur. Ayam dengan genotipe GG menunjukkan persentase produksi telur yang lebih tinggi, yaitu 72,04%, dibandingkan dengan ayam bergenotipe AA yang hanya 65,80%. Asosiasi yang kuat ini menunjukkan bahwa, meskipun SNP g.2425 A>G memiliki pengaruh minimal terhadap kualitas telur, tapi berperan penting dalam memodulasi produksi telur secara keseluruhan. Nilai deskripsi produksi memperkuat bahwa genotipe GG berkaitan dengan tingkat produksi telur yang lebih tinggi dibandingkan dengan genotipe AA. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi genetik pada lokus tersebut, meskipun tidak berpengaruh terhadap aspek kualitas telur secara nyata (kecuali pada bobot kuning telur pengaruhnya nyata), tetapi berperan penting dalam sifat produksi kuantitatif. Perbedaan efek ini menunjukkan kompleksitas performa reproduksi, yaitu faktor genetik yang berbeda dapat secara selektif mempengaruhi tingkat produksi dibandingkan dengan kualitas telur.

Hasil analisis ini memperlihatkan indikasi dampak SNP g.2425 A>G terhadap performa produksi telur pada ayam Sentul yang sangat signifikan. Di satu sisi, tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara genotipe AA dan GG dalam hal parameter kualitas telur (kecuali pada bobot kuning telur). Tidak ada asosiasi signifikan yang ditemukan dengan parameter kualitas telur yaitu pada bobot telur, bobot putih telur, haugh unit, warna kuning telur, bobot kerabang, ketebalan kerabang, dan kekuatan kerabang. Nilai taraf signifikansi uji untuk semua parameter ini berada di atas ambang batas 0,05 ($P>0,05$), menunjukkan bahwa genotipe AA dan GG secara statistik tidak berbeda dalam hal kualitas telur. Hasil ini sesuai dengan penelitian Wolc *et al.* (2014) bahwa gen yang mempengaruhi produksi telur seringkali berbeda dengan gen yang mempengaruhi kualitas fisiknya. Menurut Hocking *et al.* (2003), SNP tertentu dapat lebih berpengaruh pada produksi telur daripada kualitas telur. Penemuan ini sesuai dengan konsep bahwa kualitas telur merupakan sifat multifaktorial yang dipengaruhi oleh banyak

faktor genetik dan lingkungan, sehingga efek dari satu polimorfisme tunggal menjadi tidak terlalu dominan.

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa alel G pada lokus g.2425 A>G memiliki efek positif terhadap produksi telur. Hal ini dapat menjadi target utama dalam program pemuliaan untuk meningkatkan populasi ayam Sentul yang bergenotipe GG di masa depan. Hasil identifikasi ini relevan untuk program pemuliaan, karena genotipe GG sebagai genotipe unggul untuk meningkatkan produktivitas telur pada ayam Sentul. SNP ini dapat digunakan sebagai *marker* genetik untuk melakukan seleksi dini pada ayam-ayam muda yang berpotensi memiliki produksi telur yang tinggi. Peningkatan produksi telur adalah tujuan utama dalam industri perunggasan, dan penggunaan *marker* genetik dapat mempercepat proses seleksi dibandingkan metode seleksi tradisional yang membutuhkan pengamatan performa selama periode yang lama. Hasil penelitian ini mendukung gagasan bahwa seleksi genetik untuk produksi telur dapat dilakukan secara terpisah dari seleksi untuk kualitas telur. Identifikasi SNP g.2425 A>G sebagai *marker* untuk produksi telur merupakan langkah maju dalam program pemuliaan ayam Sentul. Vinh *et al.* (2021) menyarankan penelitian lebih lanjut pada ayam lokal dengan jumlah sampel yang lebih besar, gen kandidat tambahan, atau bahkan penggunaan pendekatan *whole-genome analysis* untuk mengungkap spektrum variasi genetik yang lebih luas. Upaya tersebut dapat membantu dalam menguraikan pengaturan genetik yang mendasari kualitas telur dan berkontribusi terhadap strategi pemuliaan yang bertujuan meningkatkan performa produksi pada populasi ayam lokal.

E. Parameter Komponen Genetik

Dalam bahasan parameter komponen genetik variabel dikelompokkan menjadi 4 (empat) golongan yaitu (1) produksi telur selama 8 minggu (minggu ke 24-31); (2) bobot telur dengan komponen penyusunnya terdiri dari bobot putih telur, bobot kuning telur, *haugt unit* dan warna kuning telur; (3) kerabang telur terdiri dari bobot kerabang, ketebalan kerabang, kekuatan kerabang dan warna kerabang; dan (4) variansi genetik terdiri dari variansi genetik aditif dan variansi simpangan dominan. Parameter genetik hanya dihitung pada ayam Sentul yang polimorfik, sedangkan pada ayam Hy-Line tidak dihitung karena monomorfik.

Dalam parameter komponen genetik dibahas tentang nilai genotipe , *point of origin*, nilai tengah populasi (m), nilai tengah populasi nyata (M), efek gen rata-rata alel (α_1, α_2),

efek gen substitusi (α), nilai pemuliaan, simpangan dominan, ragam aditif, ragam dominan dan ragam genetik. Nilai genotipe adalah nilai yang mencerminkan potensi genetik dalam satu genotipe yaitu nilai rata-rata fenotipe dari suatu genotipe tertentu. *Point of origin* adalah rata-rata atau nilai tengah yang digunakan sebagai acuan dalam analisis efek genetik yaitu nilai tengah populasi teoritis (m) atau nilai tengah fenotipe yang diharapkan jika tidak ada efek genetik. Nilai tengah populasi (m) adalah rata-rata teoritis populasi berdasarkan distribusi alel dengan asumsi tidak ada dominansi. Nilai tengah populasi nyata (M) adalah rata-rata fenotipe sebenarnya dari populasi (berdasarkan frekuensi genotipe nyata di populasi). Efek gen rata-rata alel (α_1, α_2) adalah kontribusi rata-rata satu alel terhadap nilai fenotipe. Efek gen substitusi (α) adalah perubahan rata-rata nilai fenotipe akibat substitusi satu alel dengan satu alel lain dalam populasi. Nilai pemuliaan adalah nilai genetik aditif dari suatu genotipe, yaitu jumlah efek gen rata-rata dari alel yang dimilikinya. Simpangan dominan adalah penyimpangan nilai genotipe nyata dari nilai yang diprediksi hanya berdasarkan efek aditif. Ragam aditif adalah bagian dari ragam fenotipe yang disebabkan oleh efek aditif alel, yaitu efek rata-rata setiap alel yang ditambahkan secara linier. Ragam aditif paling penting karena diturunkan ke keturunannya. Ragam dominan adalah bagian dari ragam fenotipe yang muncul akibat interaksi antara alel pada satu lokus karena nilai heterozigot tidak persis berada di tengah antara kedua homosigotnya. Ragam genetik adalah total keragaman fenotipe yang disebabkan oleh genetik, terdiri atas komponen aditif dan non-aditif (Falconer dan Mackay, 1996).

a. Parameter Genetik ayam Sentul (SNP g.2416 C>G)

Produksi Telur Selama 8 minggu (minggu ke 24-31)

Berdasarkan data pada Tabel 8, genotipe CG menunjukkan produksi telur selama 8 minggu tertinggi (69,34 %), diikuti oleh genotipe CC (67,25 %), sedangkan GG tidak terdeteksi pada populasi ini (0,00). Nilai GG 0 kemungkinan alel G bersifat resesif pada ayam Sentul. Dugaan lain penyebab nilai GG nol atau tidak terdeteksi karena sampel kurang besar. Menurut Nei dan Kumar (2000) ukuran sampel yang memadai sangat penting dalam analisis keragaman genetik agar tidak menimbulkan estimasi bias. Menurut Cochran (1977), ukuran sampel menentukan tingkat ketepatan dalam estimasi populasi, karena galat baku berbanding terbalik dengan akar dari ukuran sampel. Semakin besar

Tabel 8. Parameter genetik ayam Sentul (SNP g.2416 C>G)

| Genotipe | Prod. Telur 8 minggu (%) | Bobot Telur (g) | Bobot Putih Telur (g) | Bobot Yolk (g) | HU | Warna Yolk (skala) | Bobot Kerabang (g) | Ketebalan Kerabang (g) | Kekuatan Kerabang (kgf) | Warna Kerabang (skala) |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| CC | 67,253 | 50,612 | 26,042 | 17,650 | 86,786 | 8,636 | 6,824 | 0,370 | 0,340 | 8,636 |
| CG | 69,337 | 50,924 | 26,475 | 17,550 | 86,561 | 8,600 | 6,834 | 0,378 | 0,342 | 8,600 |
| GG | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Point of Origin | 33,626 | 25,306 | 13,021 | 8,825 | 43,393 | 4,318 | 3,412 | 0,185 | 0,170 | 4,318 |
| Nilai Genotipa (CC) | 33,626 | 25,306 | 13,021 | 8,825 | 43,393 | 4,318 | 3,412 | 0,185 | 0,170 | 4,318 |
| Nilai Genotipa (CG) | 35,710 | 25,619 | 13,454 | 8,726 | 43,168 | 4,282 | 3,422 | 0,193 | 0,172 | 4,282 |
| Nilai Genotipa (GG) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Nilai Tengah Populasi (m) | 32,169 | 23,846 | 12,348 | 8,256 | 40,670 | 4,043 | 3,206 | 0,176 | 0,160 | 4,043 |
| Nilai Tengan Populasi Nyata (M) | 65,795 | 49,152 | 25,369 | 17,081 | 84,063 | 8,361 | 6,618 | 0,361 | 0,330 | 8,361 |
| Efek Gen Rata-rata Alel C (α_1) | 1,823 | 1,514 | 0,748 | 0,552 | 2,683 | 0,269 | 0,208 | 0,010 | 0,010 | 0,269 |
| Efek Gen Rata-rata Alel G (α_2) | -8,592 | -7,139 | -3,528 | -2,601 | -12,650 | -1,266 | -0,980 | -0,049 | -0,048 | -1,266 |
| Efek Gen Substitusi (α) | 10,415 | 8,654 | 4,276 | * 3,153 * | 15,333 | 1,535 | 1,188 | 0,059 | 0,059 | 1,535 |
| Nilai Pemuliaan (CC) | 3,645 | 3,029 | 1,497 | 1,104 | 5,367 | 0,537 | 0,416 | 0,021 | 0,020 | 0,537 |
| Nilai P emuliaan (CG) | -6,770 | -5,625 | -2,779 | -2,050 | -9,967 | -0,998 | -0,772 | -0,039 | -0,038 | -0,998 |
| Nilai Pemuliaan (GG) | -17,184 | -14,279 | -7,055 | -5,203 | -25,300 | -2,532 | -1,960 | -0,098 | -0,097 | -2,532 |
| Simpangan Dominan (CC) | -2,187 | -1,569 | -0,824 | -0,534 | -2,644 | -0,262 | -0,210 | -0,012 | -0,011 | -0,262 |
| Simpangan Dominan (CG) | 10,311 | 7,397 | 3,885 | 2,520 | 12,465 | 1,236 | 0,988 | 0,056 | 0,050 | 1,236 |
| Simpangan Dominan (GG) | -48,611 | -34,873 | -18,314 | -11,878 | -58,763 | -5,829 | -4,659 | -0,263 | -0,234 | -5,829 |
| Variansi Gen Aditif (V_A) | 31,319 | 21,624 | 5,279 | 2,871 | 67,889 | 0,680 | 0,407 | 0,001 | 0,001 | 0,680 |
| Variansi Dominan (V_D) | 106,324 | 54,721 | 15,092 | 6,348 | 155,374 | 1,529 | 0,976 | 0,003 | 0,002 | 1,529 |
| Variansi Genetik (V_G) | 137,643 | 76,344 | 20,371 | 9,219 | 223,262 | 2,209 | 1,384 | 0,004 | 0,003 | 2,209 |

ukuran sampel, semakin kecil galat baku dari rata-rata atau proporsi. Artinya, estimasi parameter (misalnya frekuensi alel, rataan produksi telur) menjadi lebih mendekati nilai sebenarnya di populasi.

Efek gen rata-rata menunjukkan bahwa alel C memberikan efek positif (+1,82) terhadap jumlah produksi telur, sedangkan alel G menunjukkan efek negatif (-8,59), sehingga memberikan efek gen substitusi alel sebesar +10,42 yang menunjukkan perubahan nilai tengah populasi akibat substitusi alel G oleh alel C di dalam populasi. Hal ini diperkuat oleh nilai pemuliaan genotipe CG (-6,77) dan GG (-17,18) yang jauh lebih rendah dibandingkan CC (+3,65), sehingga dapat dikatakan alel C lebih unggul secara aditif.

Variansi genetik aditif (VA) dan variansi simpangan dominan (VD) memberikan informasi tentang potensi seleksi genetik. Variansi genetik total ($VG = VA + VD$) cukup bervariasi untuk beberapa sifat. Jika dilihat dari variansi genetik produksi telur, nilai VD (106,324) jauh lebih besar daripada VA (31,319). Hal ini menunjukkan bahwa efek gen dominan lebih besar daripada efek gen aditif pada variasi ekspresi fenotipik karakteristik produksi telur. Kondisi ini sering kali menyulitkan dalam pelaksaaan seleksi genetik karena efek genetik dominan tidak dapat diwariskan secara langsung kepada keturunannya.

Falconer dan Mackay (1996) menyatakan bahwa ragam genetik total terdiri ragam aditif, ragam dominan dan ragam epstasi. Ragam gentik (VG) adalah bagian dari keragaman fenotip yang disebabkan oleh perbedaan genetik antar individu. Ragam aditif (VA) disebabkan oleh efek rata-rata alel yang dapat diwariskan langsung dari induk ke anak. Ini adalah komponen yang paling penting dalam seleksi karena menentukan heritabilitas dan respon seleksi. Ragam dominan (VD) disebabkan oleh interaksi antara alel pada lokus yang sama. Ragam interaksi (epistasis) (VI) disebabkan oleh interaksi antara alel pada lokus yang berbeda.

Bobot Telur dan Komponen Penyusunnya

Temuan bahwa alel C memberikan kontribusi positif (+1,82 g) dan alel G memberikan efek negatif (-8,59 g) menunjukkan adanya efek gen aditif yang kuat pada bobot telur. Efek aditif ini adalah komponen utama dari variasi genetik yang dapat diwariskan dan paling efisien untuk ditargetkan dalam seleksi (Falconer dan Mackay, 1996). Meskipun genotipe CG menunjukkan bobot telur tinggi (50,92 g), sedikit lebih tinggi dari CC (50,61 g), perbedaan kecil ini diduga ada dominansi, di mana genotipe heterozigot (CG) menunjukkan kinerja yang

setara atau sedikit lebih baik daripada homozigot unggul (CC). Namun, dominansi ini relatif kecil, dan efek alel C yang superior secara aditif tetap menjadi fokus utama. Pola yang sama terjadi pada bobot putih telur dan bobot kuning telur (CC > CG), yang menegaskan bahwa alel C secara genetik terhubung dengan peningkatan keseluruhan massa telur.

Haugh Unit (HU) adalah tolok ukur utama kualitas internal telur, yang mencerminkan kekentalan dan ketinggian putih telur, berbanding terbalik dengan penurunan kualitas selama penyimpanan. Nilai HU tertinggi pada genotipe CC (86,79) menunjukkan adanya hubungan positif yang kuat antara alel C dengan kualitas internal telur yang superior. Hal ini konsisten karena HU dihitung berdasarkan tinggi putih telur dan bobot telur, yang keduanya dipengaruhi positif oleh alel C. Kualitas putih telur (HU) merupakan sifat yang sangat penting bagi industri (Williams, 1992), sehingga genotipe CC adalah target ideal untuk dipertahankan dalam program pemuliaan. Pola yang sama ditemukan pada warna kuning telur (CC lebih tinggi) menunjukkan kemungkinan adanya korelasi genetik antara gen yang mengontrol bobot/kualitas protein (putih telur) dan gen yang memengaruhi deposisi pigmen (karotenoid) pada kuning telur. Menurut Mori *et al.* (2020), genetik dapat mempengaruhi efisiensi metabolisme dan deposisi pigmen pakan ke kuning telur, sehingga individu dengan genotipe unggul mungkin juga lebih efisien dalam hal ini.

Efek gen rata-rata menunjukkan bahwa alel C memberikan efek positif terhadap bobot telur dan komponen penyusunnya, sedangkan alel G menunjukkan efek negatif. Hal ini menghasilkan efek gen substitusi (α) bernilai positif. Falconer dan Mackay (1996) menyatakan efek substitusi adalah perubahan rata-rata populasi yang dihasilkan ketika alel yang kurang baik (G) digantikan oleh alel yang lebih baik (C).

Kerabang Telur

Berdasarkan hasil pengamatan, genotipe CC menunjukkan nilai warna kerabang tertinggi (8,64), yang lebih besar dibandingkan dengan bobot kerabang (6,82), ketebalan kerabang (0,37), dan kekuatan kerabang (0,34). Hal ini mengindikasikan bahwa alel C memiliki peran penting dalam proses pembentukan warna kerabang, yang erat kaitannya dengan transfer pigmen. Samiullah *et al.* (2015) menyatakan proses pembentukan telur dikendalikan oleh faktor hormonal seperti estrogen yang memengaruhi sintesis dan deposisi pigmen, serta faktor genetik yang menentukan distribusi pigmen pada kerabang.

Ketebalan kerabang pada genotipe CG (0,38) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan genotipe CC (0,37). Kondisi ini menunjukkan adanya efek dominansi, yaitu heterozigot mampu menghasilkan fenotipe yang lebih tinggi dibandingkan homozigot (Roberts, 2004). Dilihat dari aspek kekuatan fisik kerabang, baik genotipe CC maupun CG menunjukkan nilai yang sama (0,34), mengindikasikan tidak adanya pengaruh dominansi pada karakter ini. Bobot kerabang dan warna kerabang pada genotipe CG (6,83 dan 0,38) relatif sama dengan genotipe CC (6,82 dan 0,37). Fenomena ini menunjukkan bahwa alel C bersifat over-dominan terhadap alel G pada variabel bobot dan warna kerabang, yaitu heterozigot tidak menghasilkan nilai lebih rendah dari homozigot dominan (Bain *et al.*, 2016).

Berdasarkan efek gen rata-rata, alel C konsisten memberikan kontribusi positif terhadap bobot, ketebalan, kekuatan, maupun warna kerabang. Sebaliknya, alel G menunjukkan efek negatif, sehingga substitusi alel G oleh alel C akan meningkatkan nilai tengah populasi. Kondisi ini mendukung bahwa alel C memiliki nilai aditif yang lebih unggul. Hal ini juga diperkuat dengan nilai pemuliaan genotipe CG dan GG yang jauh lebih rendah dibandingkan CC, sehingga dapat disimpulkan bahwa alel C lebih superior secara aditif dalam meningkatkan kualitas kerabang telur, baik dari segi bobot, ketebalan, kekuatan, maupun warna. Berdasarkan ragam yang diamati, variansi dominan (VD) lebih tinggi dibanding variansi aditif (VA), hal tersebut menunjukkan bahwa dominansi genetik menjadi penyebab variasi ekspresi fenotipik karakteristik bobot, ketebalan, kekuatan dan warna kerabang (Falconer dan Mackay, 1996).

Variansi Genetik (Aditif dan Dominan)

Karakteristik yang diteliti pada ayam Sentul secara keseluruhan mempunyai nilai variansi dominan (VD) lebih tinggi dibanding variansi aditif (VA). Kondisi ini menunjukkan bahwa dominansi genetik berperan sebagai penyebab variasi ekspresi fenotipik karakteristik produksi dan kualitas telur ayam Sentul. Berdasarkan nilai variansi gen aditif (VA) untuk variabel produksi telur (31,32), bobot telur (21,62), bobot putih telur (5,28), dan HU (67,89), menunjukkan potensi untuk seleksi genetik jangka panjang berbasis alel C. Nilai VA yang tinggi menunjukkan bahwa seleksi dapat dilakukan secara efektif. Nilai yang VD tinggi mengisyaratkan perlunya strategi pemuliaan kawin silang atau hibridisasi untuk memaksimalkan ekspresi karakteristik. Perbandingan VD yang lebih besar dari VA pada sifat yang diteliti sesuai dengan pernyataan Prasetyo (2012) bahwa heterosis atau efek dominan memainkan peran penting dalam pemuliaan ternak. Hal ini menyiratkan bahwa pemuliaan

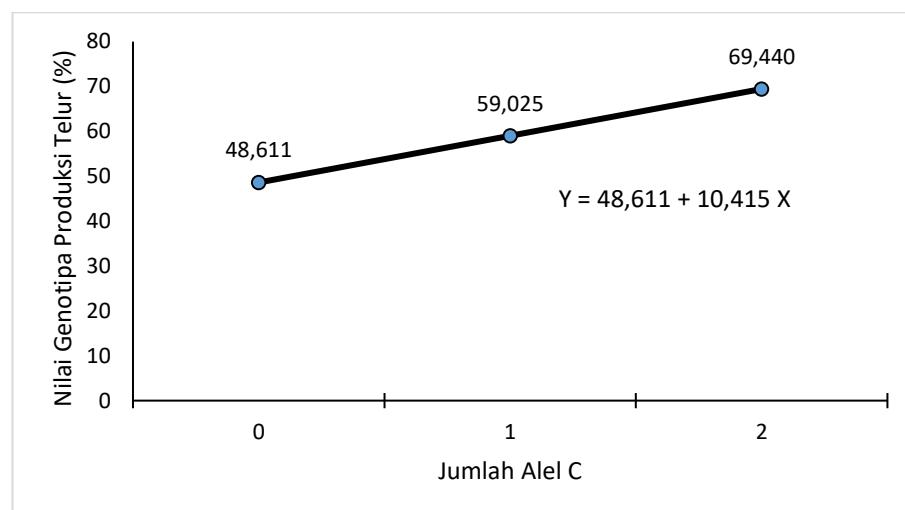
dengan memanfaatkan efek heterosis, seperti persilangan, mungkin lebih efektif daripada seleksi murni berdasarkan alel tunggal untuk meningkatkan sifat-sifat ini pada ayam Sentul.

Analisis asosiasi gen *GnRH* dengan produksi dan kualitas telur (Tabel 5) diperoleh hasil ada hubungan yang erat antara jenis alel dan genotipe terhadap produksi telur dan ketebalan kerabang ($P<0,05$). Hubungan ini menunjukkan ada peran yang nyata dari alel C dan alel G terhadap produksi telur dan ketebalan kerabang. Hasil perhitungan parameter genetik untuk produksi telur (Tabel 8) diperoleh efek gen rata-rata alel C (α_1) sebesar 1,823 % dan efek gen rata-rata alel G (α_2) sebesar -8,592 %. Efek gen rata-rata alel C memberikan pengaruh positif dan sebaliknya efek gen rata-rata alel G memberikan efek negatif terhadap performa produksi telur. Hubungan antara kedua efek gen rata-rata tersebut dapat dilihat pada efek gen substitusi (α) yaitu selisih antara efek gen rata-rata alel C dengan efek gen rata-rata alel G atau $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$). Efek gen substitusi ini menyatakan efek rata-rata mengganti alel G dengan alel C. Artinya setiap tambahan satu alel C akan meningkatkan nilai fenotipe rata-rata sebesar α unit. Wientjes *et al.* (2023) menyatakan *allele substitution effect* merupakan rata-rata perubahan saat satu alel diganti oleh yang lain. Menurut Duenk *et al.* (2017) efek gen substitusi bukan murni fungsi nilai genotipa homosigot (efek alel) tetapi terpengaruh nilai dominansi dan frekuensi alel.

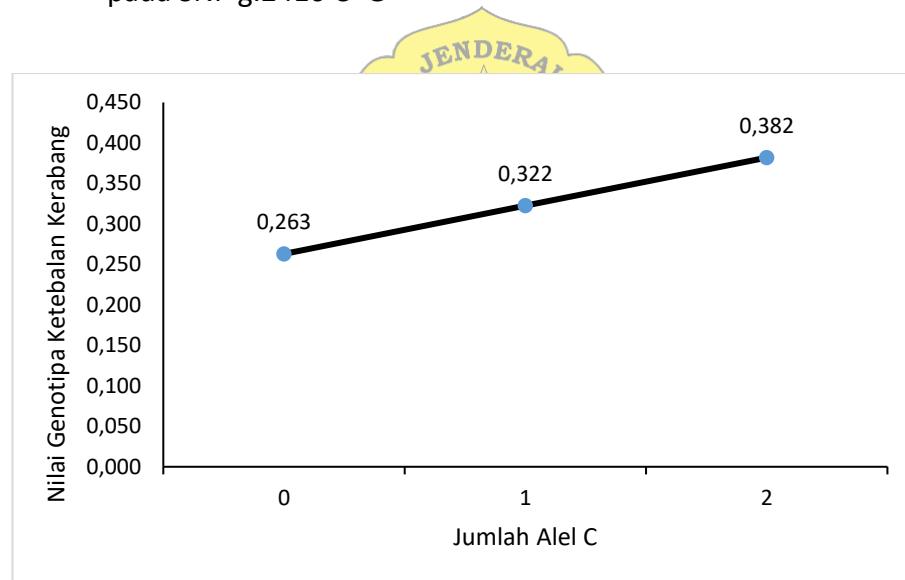
Berdasarkan data dalam Tabel 8, produksi telur nilai $\alpha_1 = 1,823$ % dan $\alpha_2 = -8,592$ % sehingga diperoleh nilai $\alpha = 10,415$ %. Artinya setiap pertambahan satu alel C akan meningkatkan nilai fenotipe rata-rata sebesar 10,415 %. Hubungan tersebut menunjukkan pula bahwa efek gen substitusi pada dasarnya merupakan koefisien regresi antara nilai genotipa dengan jumlah gen C. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 yang menunjukkan perubahan nilai genotipa produksi telur akibat bertambahnya alel C. Bertambahnya alel C dalam lokus akan meningkatkan nilai genotipa produksi telur. Efek gen substitusi juga berhubungan dengan nilai pemulian dan ragam genetik aditif. Penambahan alel C juga akan mengubah nilai pemuliaan dan ragam genetik aditif (Falconer dan Mackay, 1996).

Efek Gen Rata-rata ketebalan kerabang diperoleh nilai $\alpha_1 = 0,010$ mm dan $\alpha_2 = -0,049$ mm sehingga diperoleh nilai $\alpha = 0,059$ mm yang berarti setiap pertambahan satu alel C akan meningkatkan nilai fenotipe rata-rata sebesar 0,059 mm. Hubungan tersebut menunjukkan pula bahwa efek gen substitusi pada dasarnya merupakan koefisien regresi antara nilai genotipa dengan jumlah gen C. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4 yang

menunjukkan perubahan nilai genotipa ketebalan kerabang akibat bertambahnya alel C. Bertambahnya alel C dalam lokus akan meningkatkan nilai genotipa ketebalan kerabang.



Gambar 3. Hubungan jumlah alel C dengan nilai genotipa produksi telur pada SNP g.2416 C>G



Gambar 4. Hubungan jumlah alel C dengan nilai genotipa ketebalan kerabang pada SNP g.2416

b. Parameter genetik ayam Sentul (SNP g.2424 T>C)

Produksi Telur Selama 8 minggu (minggu ke 24-31)

Berdasarkan data pada Tabel 9, genotipe CC menunjukkan produksi telur selama 8 minggu tertinggi (68,21 %), diikuti oleh genotipe TT 67,86 %), sedangkan TC tidak terdeteksi

Tabel 9. Parameter genetik ayam Sentul (SNP g.2424 T>C)

| Genotipe | Prod. Telur 8 minggu (%) | Bobot Telur (g) | Bobot Putih Telur (g) | Bobot Yolk (g) | HU | Warna Yolk (skala) | Bobot Kerabang (g) | Ketebalan Kerabang (g) | Kekuatan Kerabang (kgf) | Warna Kerabang (skala) |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|-------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| TT | 67,86 | 50,85 | 26,53 | 17,66 | 85,97 | 8,63 | 6,91 | 0,38 | 0,35 | 8,63 |
| TC | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CC | 68,21 | 50,49 | 25,56 | 17,54 | 88,08 | 8,62 | 6,67 | 0,36 | 0,33 | 8,62 |
| Point of Origin | 68,04 | 50,67 | 26,05 | 17,60 | 87,02 | 8,62 | 6,79 | 0,37 | 0,34 | 8,62 |
| Nilai Genotipa (TT) | -0,18 | 0,18 | 0,49 | 0,06 | -1,05 | 0,00 | 0,12 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| Nilai Genotipa (TC) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Nilai Genotipa (CC) | 0,18 | -0,18 | -0,49 | -0,06 | 1,05 | 0,00 | -0,12 | -0,01 | -0,01 | 0,00 |
| Nilai Tengah Populasi (m) | -0,05 | 0,05 | 0,15 | 0,02 | -0,32 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Nilai Tengah Populasi Nyata (M) | 67,98 | 50,72 | 26,19 | 17,62 | 86,71 | 8,62 | 6,83 | 0,37 | 0,34 | 8,62 |
| Efek Gen Rata-rata Alel T (α_1) | -0,06 | 0,06 | 0,17 | 0,02 | -0,37 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Efek Gen Rata-rata Alel C (α_2) | 0,12 | -0,12 | -0,32 | -0,04 | 0,69 | 0,00 | -0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Efek Gen Substitusi (α) | -0,18 | 0,18 | 0,49 | 0,06 | -1,05 | 0,00 | 0,12 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| Nilai Pemuliaan (TT) | -0,13 | 0,13 | 0,34 | * 0,04 * | -0,74 | 0,00 | 0,09 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| Nilai Pemuliaan (TC) | 0,05 | -0,05 | -0,15 | -0,02 | 0,32 | 0,00 | -0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Nilai Pemuliaan (CC) | 0,23 | -0,24 | -0,63 | -0,08 | 1,37 | 0,00 | -0,16 | -0,01 | -0,01 | 0,00 |
| Simpangan Dominan (TT) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Simpangan Dominan (TC) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Simpangan Dominan (CC) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Variansi Genetik Aditif (V_A) | 0,01 | 0,01 | 0,11 | 0,00 | 0,51 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Variansi Dominan (V_D) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Variansi Genetik (V_G) | 0,01 | 0,01 | 0,11 | 0,00 | 0,51 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

pada populasi ini (0,000). Hal ini artinya genotipe CC berkontribusi positif terhadap produksi telur. Efek gen rata-rata alel C memberikan efek positif (+0,12) terhadap produksi telur, sedangkan alel T efeknya negatif (-0,06), sehingga efek gen substitusi alel negatif sebesar -0,18 yang menunjukkan perubahan nilai tengah populasi akibat substitusi alel C oleh alel T di dalam populasi akan menurunkan nilai tengah produksi telur sebesar -0,18 persen. Hal ini diperkuat oleh nilai pemuliaan genotipe TT (-0,13) yang jauh lebih rendah dibandingkan CC (+0,23), sehingga dapat dikatakan alel C lebih unggul secara aditif. Dari hasil perhitungan untuk genotipe TC diperoleh nilai pemulian positif (+ 0,05) yang diduga disebabkan efek gen C bersifat over dominan terhadap alel T. Jika dilihat dari variansi genetik, maka variansi dominan (VD) tidak terdeteksi, sehingga variasi genetik seluruhnya disebabkan oleh variansi aditif (VA) sebesar 0,01. Menurut Falconer dan Mackay (1996) ragam aditif (VA) disebabkan oleh efek rata-rata alel yang dapat diwariskan langsung dari induk ke anak. Ini adalah komponen yang paling penting dalam seleksi karena menentukan heritabilitas dan respon seleksi.

Bobot Telur dan Komponen Penyusunnya

Genotipe TT menunjukkan efek tertinggi pada bobot putih telur (26,53 g), diikuti bobot telur (50,85 g), bobot kuning telur (17,66 g), dan terendah warna kuning telur (8,63). Kondisi ini menggambarkan bahwa alel T lebih berperan dalam meningkatkan komponen bobot telur, terutama pada bagian putih telur. Menurut Roberts (2004) bobot putih telur sangat dipengaruhi oleh genetik serta fisiologi reproduksi induk, di mana variasi gen dapat meningkatkan deposisi albumen.

Genotipe CC menunjukkan efek tertinggi pada haugh unit (88,8), yang merupakan indikator kualitas putih telur, bobot telur (50,49 g), bobot putih telur (25,56 g), bobot kuning telur (17,54 g), dan warna kuning telur (8,62). Temuan ini menegaskan bahwa alel C memiliki kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan kualitas internal telur, khususnya putih telur. Nys *et al.* (2011) menyatakan bahwa faktor genetik mempengaruhi tinggi albumen dan indeks kualitas telur.

Karakteristik bobot telur dan komponen penyusunnya tidak ditemukan genotipe TC pada populasi ini (0,000). Tidak ditemukannya heterozigot ini mengindikasikan bahwa dalam populasi tersebut tidak ada efek dominansi yang bekerja, melainkan efek aditif dari

masing-masing alel (Falconer dan Mackay, 1996). Kondisi ini berarti bahwa baik alel T maupun C memberikan nilai yang setara tanpa adanya keunggulan fenotipe heterozigot.

Efek gen rata-rata menunjukkan bahwa alel T berkontribusi positif terhadap bobot telur, bobot putih telur, dan bobot kuning telur, sedangkan alel C menunjukkan efek negatif terhadap ketiga karakteristik tersebut. Namun, pada karakteristik haugh unit (HU) ditemukan pola yang berbeda: alel T berkontribusi negatif (-0,37), sementara alel C memberikan efek positif (+0,69). Perbedaan ini diduga disebabkan adanya perbedaan pengaruh genetik terhadap bobot telur dengan kualitas putih telur, di mana alel C lebih dominan dalam meningkatkan kualitas albumen (Samiullah *et al.*, 2015). Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa genotipe TT lebih unggul dalam meningkatkan bobot telur dan komponennya, sedangkan genotipe CC lebih unggul dalam meningkatkan kualitas internal telur, khususnya *haugh unit*. Kedua genotipe ini dapat dikatakan berkontribusi positif terhadap produksi dan kualitas telur meskipun pada aspek yang berbeda.

Kerabang Telur

Genotipe TT menunjukkan nilai warna kerabang tertinggi (8,63), kemudian bobot kerabang (6,91), ketebalan kerabang (0,38) dan kekuatan kerabang (0,35). Genotipe CC memberikan nilai yang relatif sama dengan genotipe TT yaitu warna kerabang tertinggi (8,62), kemudian bobot kerabang (6,67), ketebalan kerabang (0,36) dan kekuatan kerabang (0,33). Efek gen rata-rata menunjukkan bahwa alel T memberikan efek positif terhadap warna kerabang, sedangkan alel C menunjukkan efek negatif, sehingga memberikan efek gen substitusi bernilai positif dan dapat menyebabkan perubahan nilai tengah populasi akibat substitusi alel C oleh alel T di dalam populasi. Hal ini diperkuat pula oleh nilai pemuliaan genotipe CC yang lebih rendah dibandingkan TT, sehingga dapat dikatakan alel T lebih unggul secara aditif pada bobot, ketebalan dan kekuatan kerabang. Jika dilihat dari variansi genetik, maka alel T maupun alel C tidak memberikan variasi efek yang berarti pada ekspresi fenotipik karakteristik kerabang telur.

Variansi Genetik (Aditif dan Dominan)

Variansi Genetik Aditif (VA) adalah variansi yang muncul akibat penjumlahan efek alel secara independen, sehingga bisa diwariskan ke keturunan. Berdasarkan data Tabel 9, terlihat bahwa VA bernilai positif pada beberapa karakter yaitu produksi telur (0,01); bobot

telur (0,01); bobot putih telur (0,11); haugh unit (0,51); bobot kerabang (0,01). Bobot putih telur (0,11) dan HU (0,51) mempunyai VA cukup besar dibanding sifat lain, ini menandakan sifat tersebut paling dipengaruhi efek aditif. Artinya sifat-sifat ini memiliki komponen aditif yang nyata, sehingga seleksi pada genotipe unggul (CC untuk HU, TT untuk bobot putih telur) dapat memperbaiki kualitas telur pada generasi berikutnya.

Menurut Falconer dan Mackay, (1996) variansi genetik dominan (VD) adalah variansi yang timbul akibat interaksi antar alel dalam satu lokus (dominansi penuh, parsial, atau over dominansi). Berdasarkan data Tabel 9, semua nilai VD = 0,00 ini berarti tidak ada kontribusi dominansi pada sifat-sifat yang diamati. Penyebabnya diduga karena genotipe heterozigot (TC) tidak muncul (nilainya 0,00 pada semua variabel) sehingga tidak ada data yang menunjukkan adanya pengaruh dominansi. Implikasi dari kondisi tersebut adalah variasi sifat pada SNP ini murni ditentukan oleh efek aditif gen, bukan oleh dominansi.

Variansi Genetik Total (VG) merupakan gabungan dari variansi aditif dan dominan. Berdasarkan data, diperoleh hasil bahwa $VD = 0$, sehingga $VG = VA$. Kondisi ini berarti bahwa semua variasi genetik yang muncul pada sifat-sifat telur dalam populasi tersebut hanya berasal dari efek aditif gen, tanpa adanya kontribusi dari efek dominansi. Menurut Falconer dan Mackay (1996), ketika varians dominansi tidak terdeteksi, maka perbedaan antar genotipe semata-mata disebabkan oleh penjumlahan efek alel, bukan karena interaksi alel dalam bentuk dominansi.

Hasil estimasi varians genetik menunjukkan bahwa VG produksi telur = 0,01; bobot telur = 0,01; bobot putih telur = 0,11; haugh unit (HU) = 0,51; bobot kerabang = 0,01; dan variabel lain = 0,00. Nilai ini menunjukkan bahwa *haugh unit (HU)* menjadi karakter dengan pengaruh genetik terbesar ($VG = 0,51$). Karakter kedua yang relatif besar pengaruh genetiknya adalah bobot putih telur ($VG = 0,11$). Variabel produksi telur, bobot telur, dan bobot kerabang masing-masing menunjukkan nilai $VG = 0,01$, bahkan ada variabel lain dengan nilai $VG = 0,00$. Hal ini mengindikasikan bahwa sifat-sifat tersebut lebih dipengaruhi oleh faktor lingkungan dibandingkan faktor genetik. Variasi genetik pada sifat tersebut relatif kecil dan peningkatan kualitasnya lebih bergantung pada manajemen pemeliharaan, pakan, serta kondisi lingkungan (Nys *et al.*, 2011).

Tidak didapatkannya efek dominansi ($VD = 0$) menunjukkan bahwa perbedaan sifat antar genotipe TT dan CC ditentukan oleh efek aditif. Artinya bahwa alel T maupun C berkontribusi langsung terhadap perbedaan nilai fenotipe secara linear, tanpa ada

pengaruh keunggulan heterozigot. Menurut Falconer dan Mackay (1996), kondisi seperti ini sangat menguntungkan dalam pemuliaan karena respon seleksi akan lebih jelas dan konsisten dari generasi ke generasi. Karakter dengan VA tinggi (HU, bobot putih telur) menunjukkan seleksi berbasis SNP g.2424 T>C berpotensi efektif untuk meningkatkan kualitas internal telur ayam Sentul. Karakter dengan VA rendah lebih dipengaruhi lingkungan atau faktor gen lain, sehingga seleksi tunggal pada SNP ini tidak cukup. Karakteristik potensial untuk seleksi genetik pada SNP g.2424 T>C ayam Sentul adalah *haugh unit* (kualitas albumen) dan bobot putih telur, karena memiliki nilai variansi aditif tertinggi.

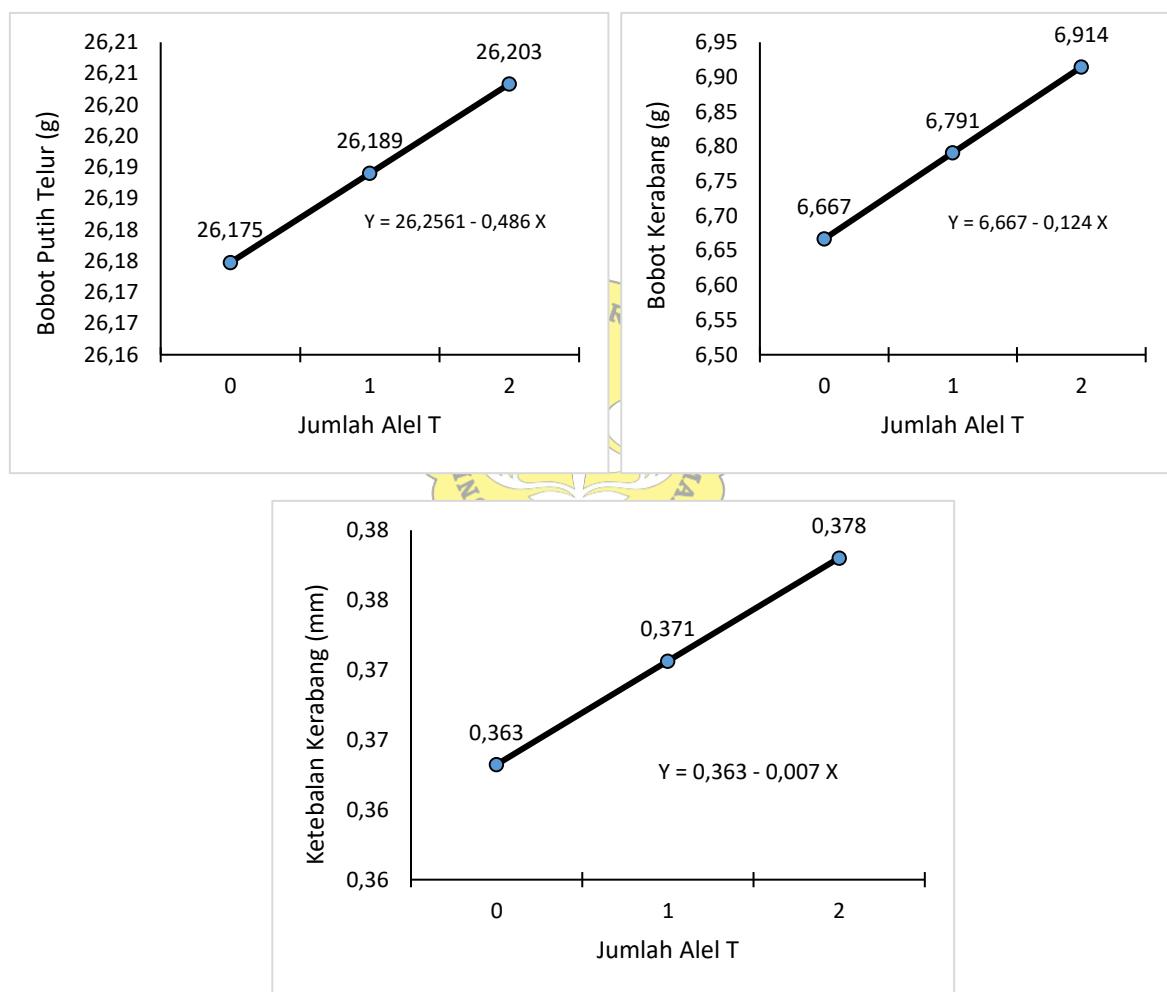
Berdasarkan Tabel 6 diperoleh hasil alel T dan alel C pada SNP g.2424 T>C mempunyai hubungan yang erat dengan bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang. Hubungan ini menunjukkan ada peran yang nyata dari alel T dan alel C terhadap bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang. Hasil perhitungan parameter genetik untuk bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang diperoleh efek gen rata-rata alel T (α_1), efek gen rata-rata alel C (α_2) dan efek gen substitusi (α) tercantum dalam Tabel 10. Efek gen rata-rata alel T memberikan pengaruh positif dan sebaliknya efek gen rata-rata alel C memberikan efek negatif terhadap performa bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang.

Tabel 10. Nilai efek gen rata-rata dan efek gen substitusi alel pada SNP g.2424 T>C

| Parameter Genetik | Bobot Putih Telur | Bobot Kerabang | Ketebalan Kerabang |
|-------------------------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| Efek gen rata-rata T (α_1) | 0,170 | 0,043 | 0,003 |
| Efek gen rata-rata C (α_2) | -0,316 | -0,081 | -0,005 |
| Efek gen substitusi (α) | 0,486 | 0,124 | 0,007 |

Hubungan antara kedua efek gen rata-rata tersebut dapat dilihat pada efek gen substitusi (α) yaitu selisih antara efek gen rata-rata alel C dengan efek gen rata-rata alel G atau $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$). Efek gen substitusi ini menyatakan efek rata-rata mengganti alel G dengan alel C, sehingga setiap tambahan satu alel C akan meningkatkan nilai fenotipe rata-rata sebesar α unit. Wientjes *et al.* (2023) menyatakan *allele substitution effect* merupakan rata-rata perubahan saat satu alel diganti oleh yang lain. Menurut Duenk *et al.* (2017) efek gen substitusi bukan murni fungsi nilai genotipa homosigot (efek alel) tetapi terpengaruh nilai dominansi dan frekuensi alel.

Hubungan tersebut menunjukkan pula bahwa efek gen substitusi pada dasarnya merupakan koefisien regresi antara nilai genotipa dengan jumlah gen C. Gambar 5 menunjukkan perubahan nilai genotipa bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang akibat bertambahnya alel T. Bertambahnya alel T dalam lokus akan meningkatkan nilai genotipa bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang. Falconer dan Mackay (1996), menyatakan efek gen substitusi juga berhubungan dengan nilai pemulian dan ragam genetik aditif. Penambahan alel T akan mengubah nilai pemuliaan dan ragam genetik aditif.



Gambar 5. Hubungan jumlah alel T dengan nilai genotipa bobot putih telur, bobot kerabang dan ketebalan kerabang pada SNP g.2424 T>C

c. Parameter genetik ayam Sentul (SNP g.2425 A>G)

Produksi Telur Selama 8 Minggu

Hasil analisis (Tabel 11) menunjukkan bahwa genotipe GG memiliki rata-rata produksi telur lebih tinggi (72,04%) dibandingkan genotipe AA (65,80%). Perbedaan ini signifikan ($p = 0,01$), sehingga SNP g.2425 A>G dapat dikaitkan dengan sifat produktivitas ayam Sentul. Nilai pemuliaan untuk genotipe GG lebih tinggi (4,06) dibanding AA (-2,19), menandakan bahwa alel G berasosiasi dengan peningkatan produksi telur. Hal ini menunjukkan bahwa alel G bersifat menguntungkan untuk meningkatkan produksi telur. Efek gen substitusi (α) sebesar -3,12 mengindikasikan bahwa substitusi alel A dengan alel G akan meningkatkan produksi telur sebesar 3,12%. Seluruh variansi genetik (VG) untuk sifat ini sebesar 4,43 sepenuhnya berasal dari variansi genetik aditif (VA), sementara variansi dominan (VD) adalah nol. Ini menunjukkan bahwa pengaruh gen terhadap sifat produksi telur bersifat aditif, dimana nilai genotipe heterozigot (AG) berada tepat di tengah-tengah nilai homozigot AA dan GG. Keadaan ini ideal untuk seleksi karena nilai fenotipe individu dapat secara langsung merefleksikan nilai genetiknya (Falconer dan Mackay, 1996).

Bobot Telur dan Komponen Penyusunnya

Tidak ada pengaruh yang signifikan secara keseluruhan dari SNP g.2425 A>G terhadap bobot telur, bobot putih telur, bobot kuning telur, *haugh unit*, dan warna kuning telur (Tabel 7). Nilai signifikansi untuk semua variabel ini cukup tinggi (0,74 untuk bobot telur, 0,94 untuk putih telur, 0,16 untuk kuning telur, 0,39 untuk HU, dan 0,65 untuk warna kuning telur). Efek gen substitusi (α) dan nilai pemuliaan untuk semua sifat ini sangat kecil, mendekati nol. Estimasi variansi genetik aditif (VA) dan dominan (VD) secara praktis adalah nol. Hal tersebut mengindikasikan bahwa SNP g.2425 A>G tidak memiliki pengaruh yang berarti terhadap sifat-sifat bobot dan kualitas internal telur pada populasi yang diteliti.

Hasil analisis pada kerabang telur relatif sama dengan kelompok bobot telur, semua parameter kerabang telur yaitu bobot kerabang, ketebalan kerabang, kekuatan kerabang, dan warna kerabang tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan (nilai $p > 0,05$). Efek gen substitusi dan komponen variansi genetiknya juga kecil dan dapat diabaikan. Kekuatan kerabang, yang merupakan indikator penting untuk mengurangi pecah telur memiliki nilai yang relatif rendah (0,33 – 0,35 kgf) pada semua genotipe. Pazokitoroudi *et al.* (2021)

Tabel 11. Parameter genetik ayam Sentul (SNP g.2425 A>G)

| Genotipe | Prod. Telur 8 minggu (%) | Bobot Telur (g) | Bobot Putih Telur (g) | Bobot Yolk (g) | HU | Warna Yolk (skala) | Bobot Kerabang (g) | Ketebalan Kerabang (g) | Kekuatan Kerabang (kgf) | Warna Kerabang (skala) |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|-------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| AA | 65,80 | 50,77 | 26,20 | 17,87 | 86,37 | 8,64 | 6,87 | 0,37 | 0,35 | 8,64 |
| AG | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GG | 72,04 | 50,64 | 26,17 | 17,15 | 87,33 | 8,59 | 6,74 | 0,37 | 0,33 | 8,59 |
| Point of Origin | 68,92 | 50,70 | 26,19 | 17,51 | 86,85 | 8,62 | 6,81 | 0,37 | 0,34 | 8,62 |
| Nilai Genotipa (AA) | -3,12 | 0,06 | 0,01 | 0,36 | -0,48 | 0,03 | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,03 |
| Nilai Genotipa (AG) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Nilai Genotipa (GG) | 3,12 | -0,06 | -0,01 | -0,36 | 0,48 | -0,03 | -0,07 | 0,00 | -0,01 | -0,03 |
| Nilai Tengah Populasi (m) | -0,94 | 0,02 | 0,00 | 0,11 | -0,14 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| Nilai Tengah Populasi Nyata (M) | 67,98 | 50,72 | 26,19 | 17,62 | 86,71 | 8,62 | 6,83 | 0,37 | 0,34 | 8,62 |
| Efek Gen Rata-rata Alel A (α_1) | -1,09 | 0,02 | 0,00 | 0,13 | -0,17 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| Efek Gen Rata-rata Alel G (α_2) | 2,03 | -0,04 | -0,01 | -0,23 | 0,31 | -0,02 | -0,04 | 0,00 | 0,00 | -0,02 |
| Efek Gen Substitusi (α) | -3,12 | 0,06 | 0,01 | 0,36 | -0,48 | 0,03 | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,03 |
| Nilai Pemuliaan (AA) | -2,19 | 0,04 | 0,01 | 0,25 | -0,34 | 0,02 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| Nilai Pemuliaan (AG) | 0,94 | -0,02 | 0,00 | -0,11 | 0,14 | -0,01 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | -0,01 |
| Nilai Pemuliaan (GG) | 4,06 | -0,08 | -0,02 | -0,47 | 0,63 | -0,03 | -0,09 | 0,00 | -0,01 | -0,03 |
| Simpangan Dominan (AA) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Simpangan Dominan (AG) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Simpangan Dominan (GG) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Variansi Genetik Aditif (V_A) | 4,43 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Variansi Dominan (V_D) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Variansi Genetik (V_G) | 4,43 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

menyatakan nilai VA dan VD yang rendah menunjukkan bahwa variasi genetik untuk sifat tertentu pada lokus tersebut hampir tidak ada.

Genotipe AA menunjukkan nilai warna kerabang tertinggi (8,64) dan lebih rendah pada bobot kerabang (6,87), ketebalan kerabang (0,37) dan paling rendah pada kekuatan kerabang (0,35). Genotipe GG memberikan nilai yang sama dengan genotipe AA. Efek gen rata-rata menunjukkan bahwa alel A memberikan efek positif terhadap keempat variabel kerabang yang diteliti. Alel G menunjukkan efek negatif, sehingga memberikan efek gen substitusi bernilai positif dan dapat menyebabkan perubahan nilai tengah populasi akibat substitusi alel G oleh alel A di dalam populasi. Pada karakteristik ketebalan kerabang substitusi alel G oleh alel A tidak memberikan efek yang berbeda atau tidak menyebabkan perubahan pada nilai rata-rata populasi. Hal ini diperkuat oleh nilai pemuliaan genotipe GG yang lebih rendah dibandingkan AA, sehingga dapat dikatakan alel A lebih unggul secara aditif pada bobot, kekuatan dan warna kerabang, kecuali pada ketebalan kerabang. Jika dilihat dari variansi genetik, maka alel T maupun alel C tidak memberikan variasi efek yang berarti pada ekspresi fenotipik karakteristik kerabang telur.

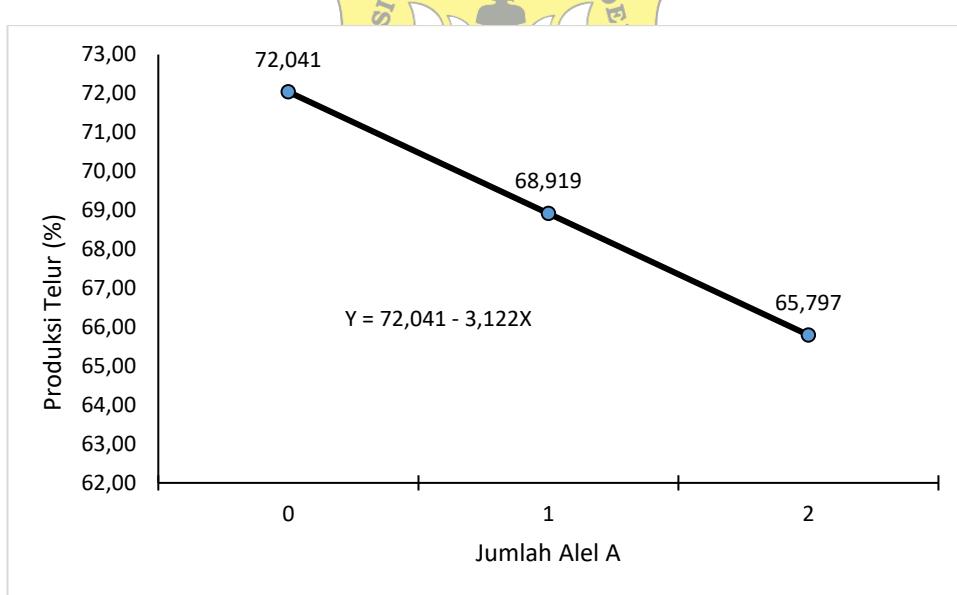
Variansi Genetik (Aditif dan Dominan)

Variansi genetik aditif (VA) hanya terdeteksi pada sifat produksi telur (4,43), bobot kuning telur (0,06) dan HU (0,11). Pada sifat lainnya, VA bernilai nol. Variansi dominan (VD) bernilai nol untuk semua sifat tanpa terkecuali. Variansi genetik (VG) sama dengan VA karena $VD = 0$. Dominannya variasi aditif dan tidak adanya variasi dominan menunjukkan pola pewarisan aditif penuh untuk semua sifat yang diukur pada lokus ini. Tidak adanya variasi dominan menunjukkan bahwa tidak terdapat efek heterosis atau dominansi pada lokus SNP g.2425 A>G untuk sifat-sifat produksi telur ayam Sentul. Dalam pemuliaan, ini berarti respon terhadap seleksi untuk produksi telur dapat diprediksi dengan baik, dan penggunaan persilangan untuk memanfaatkan heterosis pada lokus ini tidak akan memberikan efek.

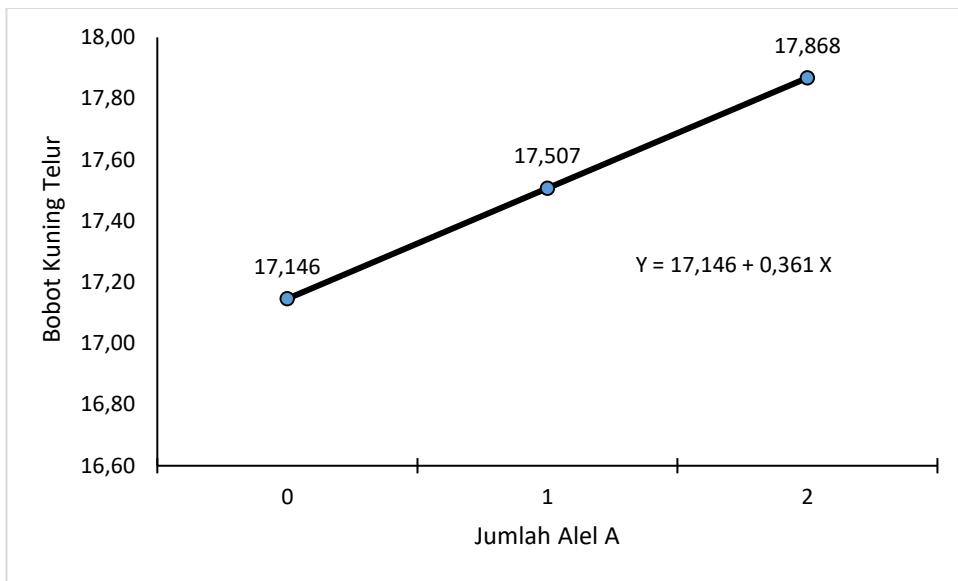
Berdasarkan data, SNP g.2425 A>G merupakan marka genetik yang sangat spesifik untuk sifat produksi telur (%) pada ayam Sentul. Genotipe GG merupakan genotipe superior dengan nilai pemuliaan tertinggi. Sementara itu, SNP ini tidak berpengaruh terhadap sifat-sifat kualitas telur (bobot, komponen internal, dan kerabang). Pola pewarisannya bersifat aditif penuh, sehingga seleksi terhadap alel G (genotipe GG) akan secara efektif meningkatkan produksi telur tanpa mempengaruhi kualitas telur. Temuan

ini berharga untuk program pemuliaan ayam Sentul berbasis marka genetik guna meningkatkan produktivitas telurnya.

Data dalam Tabel 7 diperoleh hasil ada hubungan atau asosiasi yang erat antara jenis alel A dan alel G terhadap produksi telur ($P<0,01$) dan bobot kuning telur ($P<0,05$), hubungan ini menunjukkan ada peran yang nyata dari alel A dan alel G terhadap produksi telur dan bobot kuning telur. Berdasarkan data dalam Tabel 11 untuk produksi telur diperoleh nilai $\alpha_1 = -1,093\%$ dan $\alpha_2 = 2,029\%$ sehingga diperoleh nilai $\alpha = -3,122\%$ yang berarti setiap pertambahan satu alel A akan menurunkan nilai fenotipe rata-rata sebesar 3,122 %. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa efek gen substitusi pada dasarnya merupakan koefisien regresi antara nilai genotipa dengan jumlah gen A. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 6 yang menunjukkan perubahan nilai genotipa produksi telur akibat bertambahnya alel A. Bertambahnya alel A dalam lokus akan meningkatkan nilai genotipa produksi telur. Efek gen substitusi juga berhubungan dengan nilai pemulian dan ragam genetik aditif. Penambahan alel A juga akan mengubah nilai pemuliaan dan ragam genetik aditif.



Gambar 6. Hubungan jumlah alel A dengan nilai genotipa produksi telur pada SNP g.2425 A>G



Gambar 7. Hubungan jumlah alel A dengan nilai genotipa bobot kuning telur pada SNP g.2425 A>G

Bobot kuning telur diperoleh nilai $\alpha_1 = 0,126$ g dan $\alpha_2 = -0,235$ g sehingga diperoleh nilai $\alpha = 0,361$ g yang berarti setiap pertambahan satu alel A akan meningkatkan nilai fenotipe rata-rata sebesar 0,361 g. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa efek gen substitusi pada dasarnya merupakan koefisien regresi antara nilai genotipa dengan jumlah gen A. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 7 yang menunjukkan perubahan nilai genotipa bobot kuning telur akibat bertambahnya alel A. Bertambahnya alel A dalam lokus akan meningkatkan nilai genotipa bobot kuning telur.

F. Model Matematika Kurva Produksi Telur

Model matematika telah digunakan dalam berbagai disiplin ilmu untuk mengilustrasikan dan menafsirkan data yang diperoleh melalui observasi atau pengukuran, dan untuk mengungkapkan hubungan sebab-akibat. Salah satu yang sering digunakan adalah model empiris yang menggambarkan gerak variabel terikat tanpa berusaha mendiagnosis dan menjelaskan alasannya. Model empiris yang paling banyak diterima adalah model linier dan nonlinier (Narinc *et al.*, 2014). Pemodelan produksi telur jarang dilakukan dibandingkan dengan pertumbuhan pada ayam pedaging, mungkin karena waktu yang diperlukan untuk mengikuti produksi telur lebih lama. Produksi telur dimulai pada umur kematangan seksual, dengan cepat mencapai tingkat produksi puncak, mengikuti tren linier setelah beberapa saat, kemudian menurun (Gavora *et al.*, 1982).

Model Matematika Produksi Telur Ayam Lokal (Sentul)

Hasil analisis untuk mendapatkan keempat model penaksiran produksi telur ayam Sentul yaitu fungsi Gamma Wood, fungsi regresi kuadratik, kubik, dan kuartik tercantum pada Tabel 12. Hasil analisis variansi menunjukkan bahwa keempat model matematika dapat digunakan sebagai penaksir produksi telur ($P<0,01$), demikian pula untuk seluruh koefisien regresi dapat digunakan sebagai prediktor ($P<0,01$).

Tabel 12. Nilai estimasi koefisien regresi dari setiap model matematika penaksiran produksi telur pada ayam Sentul

| Metode | Koefisien | Nilai Koefisien |
|--|---|---|
| Gamma Wood $Y_t = a \cdot t^b \cdot e^{-ct}$ | a b c | $1,6503 \times 10^{-5}$ 5,2753 -0,11694 |
| Kuadratik $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$ | β_0 β_1 β_2 | -23,7160 2,7883 - 0,0295 |
| Kubik $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3$ | β_0 β_1 β_2 β_3 | -149,2480 10,9448 - 0,1942 0,0010 |
| Kuartik $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \beta_4 X^4$ | β_0 β_1 β_2 β_3 β_4 | -377,5787 30,9579 - 0,8189 0,0093 $- 3,9369 \times 10^{-5}$ |

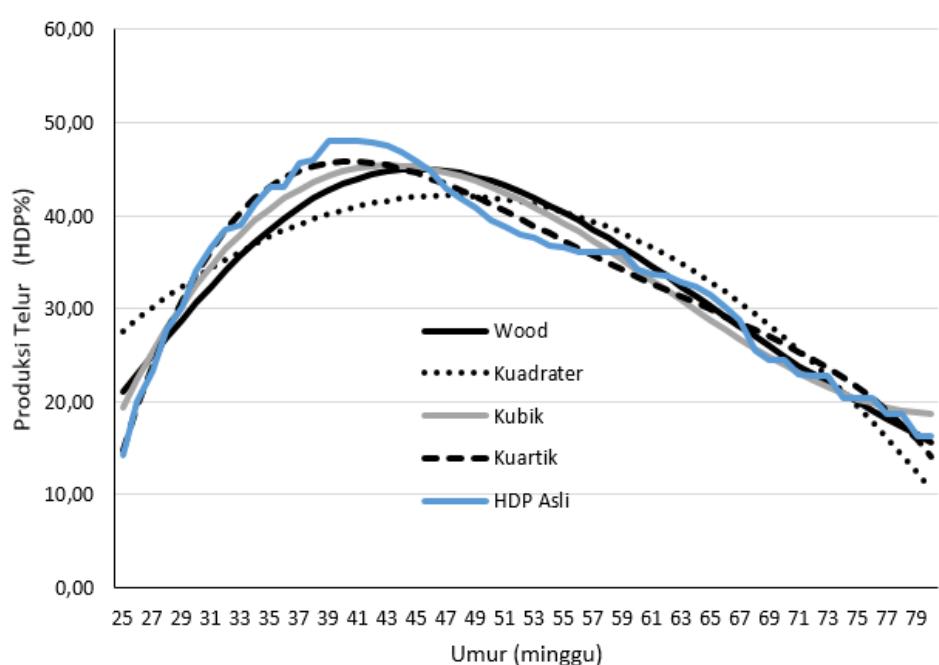
Keterangan :

- Fungsi Gamma Wood, a merupakan koefisien level awal produksi (*base line*), b merupakan koefisien yang menunjukkan kecepatan naik menuju puncak dalam kurva produksi dan c merupakan koefisien kecepatan turunnya produksi setelah mencapai puncak. Koefisien a, b dan c diaplikasikan pada persamaan fungsi gamma Wood $Y_t = a \cdot t^b \cdot e^{-ct}$ untuk pendekatan taksiran produksi telur (Y_t) pada waktu (minggu) tertentu (t).
- Nilai β_0 adalah intercep dan $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, dan β_4 adalah koefisien regresi.

Tabel 12 menyajikan koefisien persamaan model matematika yang digunakan yaitu persamaan Gamma Wood, kuadratik, kubik, dan kuartik. Model matematika didapatkan dari produksi telur produksi telur harian (HDP%) ayam Sentul selama 80 minggu. Persamaan yang didapatkan dari Gamma Wood adalah $Y_t = 1,6503 \times 10^{-5} t^{5,2753} e^{(-0,11694 t)}$. Persamaan kuadratik $Y_t = -23,7160 + 2,7883 t - 0,0295 t^2$. Persamaan kubik $Y_t = -149,2480 + 10,9448 t - 0,1942 t^2 + 0,0010 t^3$. Persamaan kuartik $Y_t = -377,5787 + 30,9579 t - 0,8189 t^2 + 0,0093 t^3 - 3,9369 \times 10^{-5} t^4$. Kurva produksi telur yang digambarkan oleh masing-masing

model dapat dibandingkan dengan HDP asli dalam grafik yang disediakan. Grafik menunjukkan setiap model dalam memprediksi atau menggambarkan tren produksi telur seiring dengan bertambahnya umur ayam (minggu). Menurut Draper dan Smith (1992), suatu persamaan regresi layak digunakan untuk inferensi atau prediksi perlu memperhatikan hasil uji keseluruhan persamaan (Uji F) dan uji koefisien regresi. Uji signifikansi statistik tidak otomatis berarti model berguna sebagai prediksi tetapi harus memperhatikan pula ukuran efek, R^2 , dan asumsi model.

Berdasarkan Gambar 8, ayam Sentul mencapai puncak produksi pada umur 37 – 44 minggu dengan HDP 45 – 48 % (data riil). Prediksi menggunakan model Gamma Wood, produksi telur mencapai puncak pada minggu ke 42- 49 dengan produksi HDP 43 – 44 %. Prediksi model Gamma Wood pada ayam Sentul lebih rendah dari kondisi HDP asli. Puncak produksi menggunakan model kuadratik pada umur 45 -50 minggu dengan HDP 41 – 42 %, dibawah dari kondisi HDP asli. Model kubik prediksi puncak produksi pada minggu ke 39 - 48 dengan HDP 44 -45 %, mendekati HDP riil. Model kuartik memprediksi puncak produksi pada umur 36 – 46 minggu dengan produksi HDP 45 – 46 %, mendekati kondisi nyata. Secara umum model kuartik memberikan gambaran persistensi yang lebih baik dengan penurunan produksi yang relatif kecil dari minggu ke 38 sampai 48.



Gambar 8. Model Gamma Wood, kuadratik dan kuartik pada ayam Sentul

Untuk dapat memilih model dengan tingkat validitas tertinggi, maka dilakukan pengujian kesesuaian model (*goodness of fit*) pada keempat model tersebut. Pengujian *goodness of fit* menggunakan *Adjusted R²*, *Mean Absolut Error (MAE)*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Akaike Information Criterion (AIC)* dan *Bayesian Information Criterion (BIC)* yang hasilnya tercantum dalam Tabel 15.

Tabel 13. Nilai *goodness of fit* dari setiap model matematik penaksiran produksi telur pada ayam Sentul

| Metode | Fungsi Gamma Wood | Regresi Kuadrater | Regresi Kubik | Regresi Kuartik |
|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------------|
| Adjusted R ² | 0,9074 | 0,7889 | 0,9241 | 0,9625 |
| MAE | 2,5807 | 3,4924 | 2,0634 | 1,4038 |
| RMSE | 3,1305 | 4,3043 | 2,5558 | 1,7792 |
| AIC | 133,8150 | 169,4769 | 113,0981 | 74,5299 |
| BIC | 139,8911 | 175,5529 | 121,1995 | 84,6567 |

Adjusted R-squared adalah versi modifikasi dari *R-squared* (R^2). *R-squared* mengukur proporsi variasi dalam variabel dependen yang dijelaskan oleh model, sedangkan *adjusted R-squared* menyesuaikan nilai ini berdasarkan jumlah prediktor dalam model dan ukuran sampel. Nilai *adjust R²* berkisar antara 0 - 1 atau 0 – 100 %, nilai yang lebih tinggi menunjukkan model yang lebih baik dalam menjelaskan variasi data (Draper dan Smith, 1992). Berdasarkan Tabel 13, koefisien determinasi yang disesuaikan (*adjust R²*) untuk model Wood adalah 90,74% menunjukkan bahwa model ini memiliki tingkat kecocokan tertinggi ketiga dibandingkan model lainnya dalam menjelaskan variasi produksi telur. *Adjust R²* untuk model kuadratik adalah 78,89 %, ketepatan terendah dari model yang digunakan. Model kubik menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam akurasi dengan *adjust R²* sebesar 92,41 %. Ini berarti model kubik lebih baik dalam menjelaskan pola produksi telur dibandingkan model Wood atau kuadratik. Model kuartik adalah yang paling akurat di antara keempat model yang digunakan dengan *adjust R²* tertinggi yaitu 96,25%. Angka ini menunjukkan bahwa model kuartik sangat akurat dan mampu menjelaskan 96,25% variasi dalam produksi telur. Nilai *adjust R²* tertinggi menjadikannya model terbaik untuk menggambarkan kurva produksi telur ayam Sentul selama 80 minggu. Hal ini menunjukkan bahwa model kuartik paling mendekati *Hen Day Production (HDP)* asli atau data produksi telur sebenarnya selama periode 80 minggu. Nilai *adjust R²* semakin besar maka model semakin baik (Draper dan Smith, 1992; Macchiotta *et al.*, 2005). Kutner *et al.*

(2005) menyatakan nilai *adjusted R²* menunjukkan seberapa baik model menjelaskan variabilitas data. *Adjusted R²* dianggap sebagai ukuran yang lebih tepat dibanding *R²* biasa karena sudah memperhitungkan jumlah variabel dalam model.

Tabel 13 menunjukkan nilai kesesuaian MAE, RSME, AIC dan BIC sebagai pembanding dengan *Adjusted R²*. Nilai kesesuaian MAE, RSME, AIC dan BIC menunjukkan tren nilai bertambah kecil dengan nilai terkecil ada pada model kuartik. Nilai RMSE dan MAE semakin kecil maka model semakin baik (Ji *et al.*, 2025). Nilai AIC semakin kecil maka model semakin baik (Burnham dan Anderson, 2004). Nilai BIC semakin kecil maka model semakin baik (Burnham dan Anderson, 2004). Bertambah kecilnya nilai kesesuaian dari metode MAE, RSME, AIC dan BIC menunjukkan bahwa model persamaan penaksir produksi telur semakin baik atau valid. Berdasarkan nilai *adjusted R²*, MAE, RSME, AIC dan BIC disimpulkan bahwa model kuartik menjadi model terbaik dalam menaksir produksi telur ayam Sentul.

Model Matematika Produksi Telur Ayam Komersial (*Hy-Line Brown*)

Hasil analisis untuk mendapatkan keempat model penaksiran produksi telur ayam *Hy-Line Brown* yaitu fungsi Gamma Wood, fungsi regresi kuadratik, kubik, dan kuartik tercantum pada Tabel 14. Hasil analisis variansi menunjukkan bahwa keempat model matematika dapat digunakan sebagai penaksir produksi telur ($P<0,01$), demikian pula untuk seluruh koefisien regresi dapat digunakan sebagai prediktor ($P<0,01$).

Tabel 14 menyajikan persamaan kurva produksi telur ayam *Hy-Line* selama 80 minggu menggunakan empat model matematika. Model yang digunakan yaitu persamaan Gamma Wood, kuadratik, kubik, dan kuartik dalam memodelkan persentase produksi telur harian (HDP%). Persamaan yang didapatkan dari Gamma Wood adalah $Y_t = 1,37637 \times 10^{-5} t^{5,5093} e^{(-0,1118 t)}$. Persamaan kuadratik $Y_t = -14,5190 + 4,3296 t - 0,0416 t^2$. Persamaan Kubik $Y_t = -203,0258 + 18,4057 t - 0,3547 t^2 + 0,0021 t^3$. Persamaan Kuartik $Y_t = -552,3555 + 53,9277 t - 1,5979 t^2 + 0,0201 t^3 - 9,1708 \times 10^{-5} t^4$.

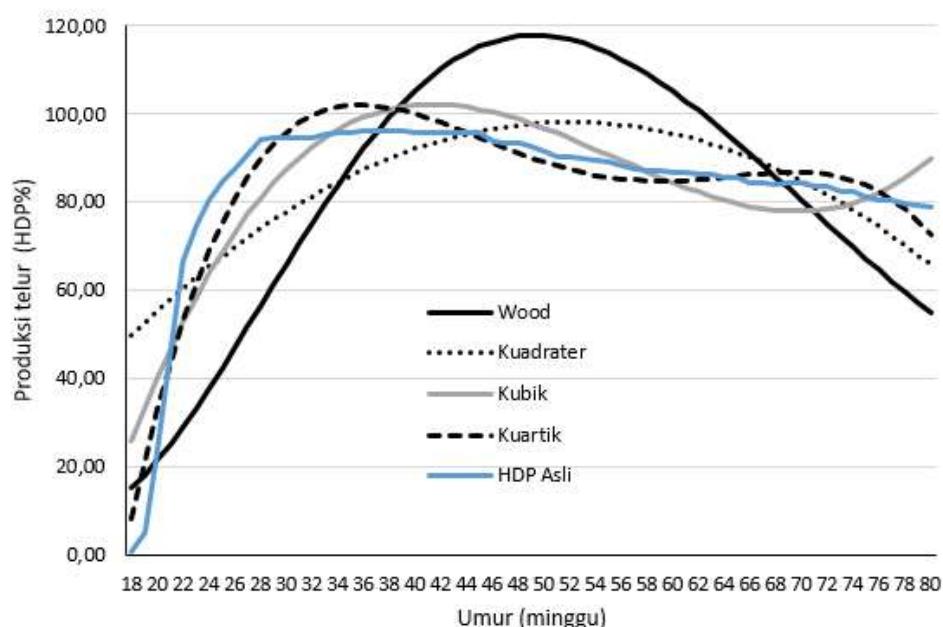
Kurva produksi telur masing-masing model dibandingkan dengan produksi telur asli (HDP) pada ayam *Hy-Line Brown* dapat dilihat pada Gambar 9. Grafik menunjukkan setiap model dalam memprediksi atau menggambarkan tren produksi telur seiring dengan bertambahnya umur ayam (minggu). Berdasarkan Gambar 9, ayam *Hy-Line Brown* mencapai puncak produksi pada umur 25 – 30 minggu dengan HDP 90 – 95 % (data riil).

Tabel 14. Nilai estimasi koefisien regresi dari setiap model matematik penaksiran produksi telur pada ayam *Hy-Line Brown*

| Fungsi | Koefisien | Nilai Koefisien |
|--|-----------|--------------------------|
| Gamma Wood $Y_t = a \cdot t^b \cdot e^{-ct}$ | a | $1,37637 \times 10^{-5}$ |
| | b | 5,5093 |
| | c | -0,1118 |
| Kuadratik $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$ | β_0 | 14,5190 |
| | β_1 | 4,3296 |
| | β_2 | - 0,0416 |
| Kubik $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3$ | β_0 | -203,0258 |
| | β_1 | 18,4057 |
| | β_2 | - 0,3547 |
| | β_3 | 0,0021 |
| Kuartik $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \beta_4 X^4$ | β_0 | -552,3555 |
| | β_1 | 53,9277 |
| | β_2 | - 1,5979 |
| | β_3 | 0,0201 |
| | β_4 | $-9,1708 \times 10^{-5}$ |

Keterangan :

- Fungsi Gamma Wood, a merupakan koefisien level awal produksi (*base line*), b merupakan koefisien yang menunjukkan kecepatan naik menuju puncak dalam kurva produksi dan c merupakan koefisien kecepatan turunnya produksi setelah mencapai puncak. Koefisien a, b dan c diaplikasikan pada persamaan fungsi gamma Wood $Y_t = a \cdot t^b \cdot e^{-ct}$ untuk pendapatkan taksiran produksi telur (Y_t) pada waktu (minggu) tertentu (t).
- Nilai β_0 adalah intercep dan $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, dan β_4 adalah koefisien regresi.



Gambar 9. Model Gamma Wood, kuadratik, kubik dan kuartik pada ayam *Hy-Line Brown*

Prediksi menggunakan model Gamma Wood mencapai puncak produksi telur pada minggu ke 49 dengan produksi HDP 65 – 70 %. Prediksi model Gamma Wood pada ayam Hy Line jauh dari kondisi HDP asli. Puncak produksi menggunakan model kuadratik pada umur 52 minggu dengan HDP 55 – 60 %, ini juga jauh dari kondisi HDP asli. Model kubik prediksi puncak produksi pada minggu ke 37 dengan HDP 78 -80 % sudah mendekati HDP riil. Model kuartik memprediksi puncak produksi pada umur 30 – 32 minggu dengan produksi HDP 90 – 92 %, mendekati kondisi nyata. Secara umum model kuartik memberikan gambaran persistensi yang lebih baik dengan penurunan produksi yang relatif kecil dari minggu ke 33 sampai 74. Alshaheen (2017) menyatakan bahwa persistensi produksi adalah hal penting yang perlu diperhatikan dalam produksi telur. Produksi telur meningkat sampai puncak, bertahan beberapa minggu kemudian menurun seiring bertambahnya umur.

Pemilihan model dilakukan dengan menentukan tingkat validitas tertinggi dengan pengujian kesesuaian model (*goodness of fit*) pada keempat model yang diteliti. Menurut Draper dan Smith (1992), signifikansi statistik tidak otomatis berarti model berguna sebagai prediksi tetapi harus memperhatikan pula ukuran efek, R^2 , dan asumsi model. Menurut Pham (2019) ketepatan penggunaan model matematika dapat diketahui dari R^2 , *Adjusted R²*, *Mean Squared Error (MSE)*, *Root Mean Squared Error (RMSE)*, *Akaike's Information Criterion (AIC)*, *Bayesian Information Criterion (BIC)*. Pengujian *goodness of fit* menggunakan *adjusted R²*, *Mean Absolut Error (MAE)*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Akaike Information Criterion (AIC)* dan *Bayesian Information Criterion (BIC)* hasilnya tercantum dalam Tabel 15.

Tabel 15. Nilai *goodness of fit* dari setiap model matematik penaksiran produksi telur pada ayam *Hy-Line Brown*

| Metode <i>Goodness of fit</i> | Fungsi Gamma Wood | Regrasi Kuadratik | Regrasi Kubik | Regrasi Kuartik |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------------|
| Adjusted R ² | 0,4734 | 0,4820 | 0,7795 | 0,9207 |
| MAE | 18,5055 | 9,5634 | 6,4450 | 3,8468 |
| RMSE | 21,5286 | 13,1771 | 8,5247 | 5,0696 |
| AIC | 392,7421 | 330,8889 | 278,0137 | 214,5321 |
| BIC | 399,1715 | 337,3183 | 286,5863 | 225,2477 |

Koefisien determinasi (R^2) menunjukkan proporsi varian respons yang dijelaskan oleh variabel prediktor dalam model regresi linear. Kutner *et al.* (2005) menyatakan *adjusted R²* memperbaiki R^2 dengan memperhitungkan jumlah prediktor (mengurangi kenaikan R^2 yang disebabkan hanya oleh penambahan variabel tanpa manfaat nyata) Berdasarkan Tabel 15, persamaan Wood koefisien determinasi yang disesuaikan (*adjust R²*) adalah 47,33%. Angka ini menunjukkan bahwa hanya sekitar 47,33% dari variasi produksi telur dapat dijelaskan oleh model Wood. Nilai ini terendah di antara keempat model, mengindikasikan bahwa model ini kurang cocok dalam merepresentasikan data produksi telur yang sebenarnya.

Persamaan kuadratik nilai koefisien determinasi yang disesuaikan (*adjust R²*) adalah 48,20%. Artinya 48,20% dari variasi produksi telur dapat dijelaskan oleh model kuadratik. Angka tersebut lebih baik dari model Wood, walaupun nilainya masih relatif rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa model kuadratik tidak terlalu akurat dalam menangkap pola produksi telur yang kompleks.

Adjust R² persamaan kubik adalah 77,95%. Ada peningkatan signifikan dalam kecocokan model dengan koefisien determinasi yang disesuaikan sebesar 77,95%. Hal ini berarti bahwa sebagian besar (sekitar 78%) dari variasi produksi telur dapat dijelaskan oleh model kubik. Model kubik menjadikannya pilihan yang lebih baik dibandingkan model Wood atau kuadratik untuk memprediksi produksi telur. Persamaan kuartik nilai *adjust R²* adalah 92,07%. Angka ini menunjukkan bahwa model kuartik sangat akurat dan mampu menjelaskan lebih dari 92% variasi dalam produksi telur. Menurut Kutner *et al.* (2005), semakin tinggi nilai *adjust R²*, semakin baik model tersebut dalam menjelaskan atau memprediksi data yang diamati. Berdasarkan hal tersebut didapatkan model kuartik terbaik untuk menggambarkan kurva produksi telur ayam *Hy-Line Brown* selama 80 minggu dibandingkan dengan model-model lainnya.

Berdasarkan Tabel 15, nilai MAE, RSME, AIC dan BIC menunjukkan tren nilai menurun dengan nilai terkecil pada model kuartik. Nilai MAE menurun dari 18,5055 (Gamma wood), 9,5634 (kuadratik), 6,4450 (kubik) dan 3,8468 (kuartik). Willmott dan Matsuura (2005) menyatakan nilai MAE yang rendah berarti *error rata-rata absolut* semakin kecil, sehingga model semakin akurat. Nilai MAE mudah ditafsirkan karena berada pada satuan yang sama dengan variabel terikat; semakin rendah nilainya, semakin baik performa prediksi. Nilai RMSE turun drastis dari 21,5286 (Gamma wood), 13,1771 (kuadratik), 8,5247 (kubik) dan

5,0696 (kuartik). Chai dan Draxler (2014) menyatakan RMSE mempertimbangkan lebih besar pada *error* yang ekstrem dibandingkan MAE, oleh karena itu penurunan RMSE menunjukkan perbaikan signifikan pada kualitas model.

Nilai AIC menurun drastis: 392,74 (Gamma wood), 330,89 (kuadratik), 278,01 (kubik), dan 214,53 (kuartik). Menurut Akaike (1974), AIC menyeimbangkan *goodness of fit* dengan kompleksitas model. Penurunan nilai pada model orde lebih tinggi berarti tambahan parameter justru membuat model lebih efisien dalam menangkap pola. Nilai AIC yang lebih rendah menunjukkan model lebih efisien secara informasi. Nilai BIC juga turun 399,17 (Gamma wood), 337,31 (kuadratik), 286,58 (kubik), dan 225,25 (kuartik). Schwarz (1978) menyatakan nilai BIC yang rendah menunjukkan model lebih baik. Jika BIC turun sejalan dengan AIC, maka model yang lebih kompleks masih lebih unggul.

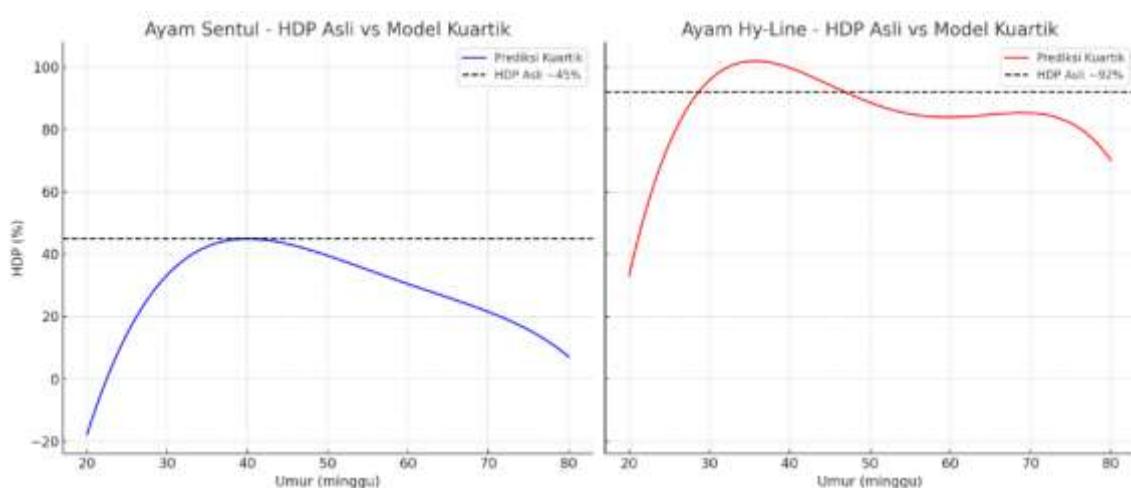
Secara keseluruhan, model regresi kuartik menunjukkan performa terbaik karena memiliki *adjusted R²* tertinggi serta MAE, RMSE, AIC, dan BIC terendah. Bertambah kecilnya nilai kesesuaian dari metode MAE, RSME, AIC dan BIC menunjukkan bahwa model persamaan penaksir produksi telur semakin baik atau valid. Berdasarkan metode *goodness of fit* yang digunakan dan nilai yang didapat disimpulkan bahwa model kuartik menjadi model terbaik dalam menaksir produksi telur ayam *Hy-Line Brown*.

Model matematika berbeda dalam menggambarkan bentuk kurva produksi telur dan kecermatan pendugaannya tergantung pada nilai koefisien determinasi atau R^2 (Atta *et al.*, 2010). Nilai estimasi parameter pada empat model matematika yang digunakan berbeda-beda sehingga mempengaruhi grafik kurva produksi telur ayam yang diteliti. Perbedaan nilai parameter mempengaruhi persistensi kemampuan genetik individu dalam produksi telur. Menurut Grossman *et al.* (2000) ukuran persistensi pada ayam petelur penting untuk seleksi genetik karena puncak produksi yang berlangsung lama menguntungkan peternak. Menurut Narinc *et al.*, (2014) jika model hanya dimaksudkan untuk memprediksi total produksi telur dari data parsial, maka model linier sebaiknya digunakan karena kesederhanaannya dan biayanya yang lebih rendah.

Berdasarkan Gambar 8 dan 9, ayam *Hy-Line Brown* sudah mulai bertelur pada umur 18 minggu, sedangkan ayam Sentul mulai berproduksi pada umur 25 minggu, lebih lambat 7 minggu. Kematangan umur seksual ini akan berpengaruh pada total produksi telur yang dihasilkan. Perbedaan performan tersebut diduga karena ada perbedaan genetik pada galur yang diteliti. Ayam Sentul merupakan ayam lokal yang belum diseleksi dengan baik

untuk tujuan penghasil telur, sedangkan ayam *Hy-Line Brown* merupakan ayam komersial yang diseleksi secara khusus untuk produksi telur. Hal tersebut terjadi karena performan produksi dipengaruhi oleh variasi genetik yang dimiliki oleh setiap individu dan lingkungan tempat ternak dipelihara (Hill dan Mackay, 2004; Johnston dan Gous, 2007).

Berdasarkan Tabel 13 dan 15, *goodness of fit* model kuartik menjadi model terbaik dalam menaksir produksi telur ayam lokal (*Sentul*) dan komersial (*Hy-Line Brown*). Model Gamma Wood memberikan *goodness of fit* yang berbeda peringkatnya. Model Gamma Wood mempunyai kecermatan peringkat tiga pada ayam lokal tapi peringkat terakhir pada ayam komersial. Menurut Sharifi *et al.* (2022), model Wood tidak dirancang untuk pola produksi yang sangat asimetris dengan puncak cepat dan tinggi, kemudian persistensi yang panjang dan lama. Wood dirancang lebih natural dengan kenaikan dan penurunan mengikuti pola biologis eksponensial sehingga ketepatannya kurang bila digunakan pada ayam komersial yang dilakukan seleksi secara ketat. Pada ayam lokal prediksi dengan Gamma Wood mempunyai kecermatan yang cukup tinggi yaitu mencapai 90,73%. Hal tersebut karena produksi telur pada ayam lokal tidak terlalu intensif, lebih natural, persistensi produksinya rendah sehingga kenaikan dan penurunan mengikuti pola biologis eksponensial yang diakomodasi Wood. Model kuartik mampu menggambarkan puncak produksi ayam komersial mendekati nilai asli, sedangkan model Wood tidak dapat memberikan gambaran yang baik karena asumsi biologisnya tidak sesuai dengan pola intensif *Hy-Line Brown*.



Gambar 10. Grafik perbandingan HDP asli dengan prediksi model terbaik (kuartik)

Secara umum model kuartik memberikan gambaran persistensi yang cukup baik pada ayam lokal (Sentul) dan komersial (*Hy-Line Brown*). Berdasarkan Gambar 10, pada ayam Sentul (kiri) model kuartik berhasil menggambarkan HDP asli (45%) dengan puncak sekitar minggu 40–45, sedang ayam Hy-Line (kanan) model kuartik mendekati HDP asli (92%) dan mengikuti pola puncak tinggi serta persistensi yang panjang. Gambaran ini penting karena menurut Savegnago *et al.* (2012b) kurva model yang didapat seperti puncak dan persistensi produksi, dapat digunakan untuk penerapan kriteria seleksi baru dalam meningkatkan potensi produktivitasnya. Alshaheen (2017) menyatakan bahwa persistensi produksi adalah hal penting yang perlu diperhatikan dalam produksi telur. Produksi telur meningkat sampai puncak, bertahan beberapa minggu kemudian menurun seiring bertambahnya umur.

