

ABSTRACT

This research aimed to analyze the effects of population structures to the genetic processes (mating systems, gene flow and selection), and their role on determining the reproductive outputs and population genetic parameters, in several sandalwood populations along landscape and environmental gradients in Gunung Sewu Geopark, Java Island, Indonesia. The specific objectives are: (1) to analyze the population structures; (2) to analyze the genetic diversity; (3) to analyze the genetic processes with regard to migration and selection; (4) to analyze the genetic processes with regard to the mating systems; and (5) to analyze the effects of population structures, floral traits, mating systems and genetic diversity to the reproductive outputs and offspring genetic diversity. These specific objectives were accomplished through seven experiments.

Methods applied in this study involved (1) the environmental parameters measurements, (2) measurements on population structures, the extent of clonality and offspring recruitments, (3) isozyme analysis, (4) flowering and fruiting phenology observation, (5) pollinators and pollination observation, (6) hand pollination experiments, and (7) the reproductive parameters measurements.

Results conformed the **hypothesis 1**: the differences on landscapes and habitat characteristics resulted in the variation on population structures, environmental and climatic conditions. Results conformed the **hypothesis 2**: the genetic diversity varied with the differences on population structures. Flowers abundance and degree of clonality play the most important role on determining genetic diversity. Results conformed the **hypothesis 3**: migration and selection varied with the differences on population structures. The gene flow restriction, genetic differentiation and bottleneck effects were more apparent in the more fragmented, lower genetic base and/or clonalized populations. Some of the results conformed the **hypothesis 4** while some others were contradicting this. Mating systems varied with the differences on flowering and pollination events. A departure from hypothesis 4 including the reduction of outcrossing, along with the increment of inbreeding, in the more flowered populations. Particularly in the clonalized and low genetic bases' populations, geitonogamy dominated mating systems. Some of the results conformed the **hypothesis 5** while some others were contradicting this. Population structures, migration, selection, mating systems and genetic base affect reproductive outputs and offspring genetic diversity. Clonality significantly increased inbreeding coefficient and selfing rate, which in turn reduced outcrossing, population heterozygosity and seedling survival. Parental heterozygosity significantly increased outcrossing, offspring heterozygosity and seedling survival. The outcrossing rate significantly increased offspring heterozygosity and seedling survival. Flowers abundance significantly enhanced seed sets and seedling recruitments (confirms the hypothesis). However as a result of geitonogamy, it significantly reduced outcrossing, population heterozygosity and final reproductive outputs (seedling survival), which is against the hypothesis. The departure from hypothesis 5 also include the proof that the wider genetic base could enhanced outcrossing, offspring heterozygosity and survival, even in a condition where the population size is small.

The ability to maintain outcross-mating and higher genetic diversity within population, and to perform high reproductive outputs, were resulted from the combined effect of four factors: (1) the structure of population, including landscapes and habitat characteristics, which contributed to the degree of clonality, fragmentation and isolation; (2) the gene flow with regard to pollen flow and seed dispersal; (3) the reproductive biology, particularly the flowering, pollination and mating pattern; and (4) the composition of parents, with regard to the genetic base and clonality. Several recommendations on designing the conservation strategy are proposed: (1) mapping of genetic diversity and genetic differentiation according to IUCN standard; (2) improving parental genetic base; (3) preventing the parental clonality; (4) enlarge the population size; (5) facilitate natural generative-seedling recruitments; (6) optimizing outcrossing in population by flowering, pollinators and pollination management, and outcross-planting design; (7) landscape connectivity to facilitate gene flow and prevent habitat fragmentation; (8) managing selection process in population; (9) establishing sandalwood conservation areas; (10) establishing new plantations of sandalwood; and (11) conduct further genetical and taxonomic studies on the possible occurrence of new variants.

Keywords: sandalwood, Gunung Sewu Global Geopark Network, population structures, genetic processes, mating systems, migration, selection, reproductive outputs, genetic diversity

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh struktur populasi terhadap proses-proses genetik (sistem perkawinan, aliran gen dan seleksi), serta pengaruhnya dalam menentukan luaran reproduksi dan parameter genetika populasi, pada beberapa populasi cendana sepanjang gradien lanskap dan lingkungan di Gunung Sewu Geopark, Indonesia. Tujuan umum ini terbagi menjadi beberapa tujuan khusus yaitu: (1) menganalisa struktur populasi; (2) menganalisa keragaman genetik; (3) menganalisa proses genetik berupa aliran gen dan seleksi; (4) menganalisa proses genetik berupa sistem perkawinan; and (5) menganalisa pengaruh struktur populasi, pembungaan, sistem perkawinan dan keragaman genetik terhadap luaran reproduksi dan keragaman genetik keturunan. Tujuan khusus dicapai melalui tujuh eksperimen. Metode yang diaplikasikan adalah (1) pengukuran parameter lingkungan, (2) pengukuran struktur populasi, tingkat klonalitas dan permudaan alam, (3) analisis isozim, (4) pengamatan fenologi pembungaan hingga buah masak, (5) pengamatan penyerbukan dan agen penyerbuk, (6) eksperimen penyerbukan terkendali, dan (7) pengukuran parameter reproduksi.

Hasil penelitian ini mengkonfirmasi **hipotesis 1**: perbedaan lanskap dan karakteristik habitat berpengaruh pada variasi struktur populasi, kondisi lingkungan dan iklim. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi **hipotesis 2**: keragaman genetik bervariasi seiring dengan bervariasinya struktur populasi. Kelimpahan bunga dan tingkat klonalitas merupakan komponen yang secara signifikan menurunkan keragaman genetik. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi **hipotesis 3**: proses genetik migrasi dan seleksi bervariasi seiring dengan bervariasinya struktur populasi. Hambatan aliran gen, diferensiasi genetik dan bottleneck effects lebih jelas tereksprei pada populasi yang lebih terfragmentasi, klonal dan/atau memiliki basis genetik rendah. Sejumlah hasil penelitian ini mengkonfirmasi **hipotesis 4** sedangkan beberapa hasil lainnya bertentangan. Sistem perkawinan bervariasi seiring dengan bervariasinya pembungaan dan penyerbukan. Hasil yang bertentangan dengan hipotesis 4 adalah berkurangnya tingkat penyerbukan silang, seiring dengan peningkatan penyerbukan sendiri, justru pada populasi yang berbunga melimpah. Terutama pada populasi klonal dan berbasis genetik rendah, sistem perkawinan didominasi geitonogami. Sejumlah hasil penelitian ini mengkonfirmasi **hipotesis 5** sedangkan beberapa hasil lainnya bertentangan. Struktur populasi, pembungaan, sistem perkawinan dan keragaman genetik induk mempengaruhi luaran reproduksi dan keragaman genetik keturunan. Tingkat klonalitas meningkatkan inbreeding coefficient dan selfing rate, dan sebaliknya menurunkan outcrossing, heterozigositas populasi dan ketahanan semai. Heterozigositas induk meningkatkan outcrossing, heterozigositas anakan dan ketahanan semai. Outcrossing rate secara signifikan meningkatkan heterozigositas anakan dan ketahanan semai. Walaupun kelimpahan bunga meningkatkan produksi biji dan permudaan alam (sesuai dengan hipotesis), namun sebagai akibat dari inbreeding, kelimpahan bunga justru menurunkan tingkat outcrossing, heterozigositas populasi dan luaran reproduksi final (bertentangan dengan hipotesis). Hal lain yang bertentangan dengan hipotesis 5 adalah adanya bukti bahwa populasi dengan ukuran populasi efektif yang kecil ternyata mampu mempertahankan tingkat outcrossing, keragaman genetik dan ketahanan anakan yang tinggi, selama populasi tersebut memiliki basis genetik yang luas.

Beberapa hal penting yang menentukan proses reproduksi dan keragaman genetik populasi cendana di Indonesia adalah: (1) struktur populasi, termasuk karakteristik habitat dan lanskap, yang menentukan tingkat klonalitas, fragmentasi dan isolasi; (2) aliran gen yang dapat berupa aliran tepung sari maupun penyebaran biji; (3) biologi reproduksi, terutama pembungaan, penyerbukan dan pola perkawinan; dan (4) komposisi induk atau tetua dalam populasi, yang meliputi basis genetik dan tingkat klonalitas. Sebagai dasar untuk mendisain strategi konservasi, diajukan rekomendasi: (1) pemetaan keragaman dan diferensiasi genetik sesuai standar IUCN; (2) peningkatan basis genetik induk; (3) pencegahan klonalitas; (4) peningkatan ukuran populasi efektif; (5) memfasilitasi permudaan alam secara generatif; (6) mengoptimalkan outcrossing dalam populasi dengan manajemen pembungaan, penyerbukan, dan penyusunan disain pertanaman kawin-silang; (7) membangun konektivitas lanskap untuk memfasilitasi aliran gen dan menghindari terjadinya fragmentasi habitat; (8) mengendalikan proses seleksi dalam populasi; (9) membangun area konservasi in situ dan ex situ; (10) membangun pertanaman-pertanaman baru; dan (11) penelitian lebih lanjut pada aspek genetis (molekuler) dan taksonomis untuk mendeteksi kemungkinan munculnya varian-varian baru.

Kata kunci: cendana, Gunung Sewu Global Geopark Network, struktur populasi, proses-proses genetik, sistem perkawinan, migrasi, seleksi, luaran reproduksi, keragaman genetik