

Transformasi *planform* dari dua dimensi (2D) menjadi tiga dimensi (3D) bilah turbin angin sumbu horizontal (*horizontal axis wind turbine, HAWT*) berskala kecil dimanfaatkan untuk menggantikan mekanisme pengendalian sudut *pitch* dan meningkatkan kinerjanya. Modifikasi ujung bilah turbin angin berupa sudut *swept* dan sudut *anهدral* dapat mengubah pola aliran dua dimensi dalam asumsi *blade element momentum theory (BEMT)* menjadi tiga dimensi. Desain modifikasi ujung yang tepat diharapkan dapat meningkatkan kinerja turbin angin melalui penurunan rugi-rugi ujung dan pemanfaatan *roll-up vortex* untuk menambah energi kinetik aliran di bagian sisi hisap bilah baik pada desain dengan rasio kecepatan ujung rendah maupun tinggi.

Penelitian desain bilah turbin angin tiga dimensi ini meliputi pembahasan pemilihan rasio kecepatan ujung yang sesuai untuk desain bilah menggunakan metode Ragheb, Wilson dan *maximum tip speed threshold (MTST)* dengan radius 1,2 m; penyekalaan bilah menggunakan teorema Buckingham π untuk bilah dengan rasio kecepatan ujung desain 6,25; pemilihan *airfoil* berdasarkan *BEMT*; modifikasi ujung bilah pada model terowongan angin dengan variasi sudut *swept* mundur 20^0 dan 45^0 satu tekukan dengan dan tanpa tambahan sudut *anهدral* 15^0 , variasi sudut *swept* (maju dan mundur) dua tekukan 30^0 dan 45^0 dengan dan tanpa tambahan sudut *anهدral* 15^0 ; dan modifikasi ujung bilah pada prototipe pengujian di lapangan dengan variasi sudut *swept* 45^0 dengan dan tanpa sudut *anهدral* 15^0 . Model bilah untuk pengujian di terowongan angin didesain pada rasio kecepatan ujung 4,6 sementara prototipe pengujian di lapangan ditentukan pada rasio kecepatan ujung 8. Pengujian kebisingan terhadap pengaruh modifikasi bentuk ujung bilah untuk desain rasio kecepatan ujung 5,24 juga dilakukan di dalam penelitian ini.

Hasil penelitian dan pembahasan menunjukkan bahwa (1) rasio kecepatan ujung ideal desain rotor turbin angin berbilah tiga idealnya antara 5,24 hingga 5,45, namun nilai tersebut dapat dinaikkan untuk mendekati efisiensi Betz hingga 6,27 dengan mempertimbangkan kebisingan yang akan timbul, (2) teorema Buckingham π secara efektif dapat digunakan untuk penyekalaan bilah, (3) *airfoil* yang memiliki rasio luncur tinggi, koefisien gaya angkat dan gaya hambat rendah menghasilkan karakteristik koefisien daya turbin yang tinggi dan tidak sensitif terhadap perubahan rasio kecepatan ujung, (4) modifikasi ujung satu tekukan *swept* 45^0 ditambah sudut *anهدral* 15^0 mampu meningkatkan kinerja rotor turbin yang didesain pada rasio kecepatan rendah, dan (5) modifikasi ujung *swept* 45^0 tanpa tambahan sudut *anهدral* 15^0 untuk bilah rotor dengan rasio kecepatan ujung tinggi memberikan karakteristik koefisien daya yang lebih baik dari pada bilah tanpa modifikasi dan bilah dengan *swept* 45^0 ditambah sudut *anهدral* 15^0 . Modifikasi bilah di bagian ujung dapat mempengaruhi kebisingan rotor pada pita frekuensi tinggi saat beroperasi karena perubahan lepasan vorteks ujung.

Kata kunci: *HAWT, BEMT*, dua dimensi (2D), tiga dimensi (3D), *roll-up vortex*, kebisingan

The transformation of the two-dimensional (2D) planform into a three-dimensional (3D) horizontal axis wind turbine blades (HAWT) was used to replace the pitch angle control mechanism and to improve its performance. Modification of wind turbine blade tip in the form of swept and anhedral angle can change the two-dimensional flow pattern in the assumption of blade element momentum theory (BEMT) into three dimensions. The appropriate tip modification design is expected to increase the power coefficient through the reduction of tip losses and the use of roll-up vortex to increase kinetic flow energy on the suction side of the blade both in designs with low and high tip speed ratios.

This three-dimensional wind turbine blades design study includes a discussion of choosing the appropriate tip speed ratio for blade design using the Ragheb, Wilson method and maximum tip speed threshold (MTST) with a radius of 1.2 m; blade scaling using the Buckingham π theorem for blades with a tip speed ratio design of 6.25; selection of airfoil based on BEMT; modification of blade tip in wind tunnel model with 20° and 45° backward swept angle variations of one bend with and without additional 15° anhedral angles, variation of swept angles (forward and backward) of 30° and 45° of two bend with and without additional anhedral angle of 15° ; and modification of the blade tip on the prototype test in the field with a variation of the swept angle of 45° with and without anhedral angle of 15° . The wind tunnel model blades were designed at a tip speed ratio of 4.6 while the prototype testing in the field was determined at the tip speed ratio of 8. Noise testing on the effect of the blade tip shape modification for the tip velocity ratio design of 5.24 was also carried out in this study.

The results of the study and discussion show that (1) the ideal tip speed ratio of the three-bladed wind turbine rotor design is between 5.24 to 5.45, but that value can be increased to approach the Betz efficiency to 6.27 taking into account the noise that will arise, (2) Buckingham theorem π can effectively be used for blade scaling, (3) airfoils that have a high gliding ratio, lift coefficient and low drag produce a characteristic of high power coefficient and are not sensitive to changes in tip speed ratio, (4) one end swept 45° modified tip plus 15° anhedral angle can improve the performance of the turbine rotor designed at a low tip speed ratio, and (5) tip modification of the swept 45° without an additional anhedral angle 15° for rotor blades with a high tip speed ratio giving better power coefficient characteristics than the blades without tip modification and blades with swept 45° plus anhedral 15° . The blade modification at the tip could affect rotor noise in the high frequency band when operating due to changes in the discharge of the tip vortices.

Keywords: HAWT, BEMT, two dimensions (2D), three dimensions (3D), roll-up vortex, noise