

## 풍력 블레이드 분리를 위한 연구 동향 분석

정우성\* · 박현범\*\*

### Investigation on Research Trends for Separation of Wind Turbine Blade

Wooseong Jeong\* and Hyunbumm Park\*\*

*Key Words* : Wind turbin blade (풍력 터빈 블레이드), Segmented (세분화), Split blades (분할 블레이드),  
Modular design (모듈식 설계), Blade joint s(블레이드 접합부)

#### ABSTRACT

Research is being actively conducted to increase energy production by increasing the length of wind turbine blades. However, it is difficult to manufacture and transport large-scale blades. Various studies are being conducted on the concept of separate wind turbine blades considering transportation methods and maintenance. In this study, various methods of dividing blades and assembling the divided blades were reviewed. The position of the division when the blades are divided was analyzed.

#### 기호설명

$P$  : 동력 [W]

$A$  : 터빈 면적( $m^2$ )  
 $\rho$  : 공기 밀도( $kg/m^3$ )  
 $v_{\infty}$  : 풍속( $m/s$ )

### 1. 서론

풍력에너지는 바람이 가지는 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 전력을 생산하는 시스템으로 생산된 전력을 가정용, 공업용 등으로 사용할 수 있다. 오늘날 풍력은 수많은 국가에서 상대적으로 값이 싼 재생 가능 에너지를 제공하며 탄소가 거의 없는 전기를 생산하기 때문에 관련 분야의 연구와 적용이 활발해지고

있다. 또한 풍력 발전기의 출력은 블레이드 직경에 비례하기 때문에 점점 더 대형화되는 추세이다.[1, 2]

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^3 \quad (1)$$

최근 풍력 발전 시스템의 블레이드 대형화로 인해 무게 및 길이가 증가하여 블레이드 운송이 어려워지고 있다. 특히 국내의 경우 산악지형이 많으므로 육상풍력단지의 지리적 특성상 대형 블레이드의 운송 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 블레이드를 분리하여 개발한 후 결합하는 방법을 연구하기 위하여 기존에 분리형 블레이드를 개발한 사례 중심으로 최근 연구 동향을 분석하였다.

\*군산대학교 대학원 기계공학과

\*\*군산대학교 기계공학부 교수(교신저자)

E-mail : swordship@kunsan.ac.kr

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2023.14.4.008>

Received : October 24, 2023, Revised : November 16, 2023

Accepted : November 20, 2023

## 2. 본 론

### 2.1 분리형 블레이드 개념

본 연구에서 분리형 블레이드 연구를 위한 선행 연구로서 기존의 국내외 분리형 블레이드의 개념을 분석하였다. 분리형 블레이드의 개념은 크게 재결합이 가능한 방식과 재결합이 불가능한 방식으로 나눌 수 있다. 재결합이 가능한 방식은 체결 부의 하중 방향에 따라 볼트의 길이 방향과 전단 방향으로 나눌 수 있으며, 대표적으로 T-bolts 방식이 대표적이다. 그리고 재결합이 불가능한 방식은 열경화성 접착제를 통한 접합 방식이 대표적이다. 풍력 터빈 블레이드의 분할을 통해 얻을 수 있는 잠재적 이득은 제작 및 운송 비용 절감이다. 따라서 대형 블레이드의 운송에는 도로의 폭, 넓이, 회전반경, 지반 허용 하중 등이 고려되어야 한다. 그러나 분리형 블레이드는 분할 시 블레이드의 하중 전달을 위한 장치가 필요하며, 분할 부분에서 피로 파괴에 취약한 경향을 분석하였다. 현대 블레이드는 높은 효율을 위하여 깃 끝 속도비(Tip Speed Ratio)가 증가하는 추세로 설계되어 있으며, 그로 인해 블레이드 시위 방향은 짧아지고, 스펠 방향은 길어지는 추세이다. 이러한 블레이드는 분할 시 접합부를 위한 영역이 감소하는 형태가 된다.

Fig. 1에서 각각 다른 분리형 블레이드의 종류에 대해 제시하였다. (a)의 형상은 블레이드 폭을 줄이기 위해 뒷전을 분리하는 형상이다. (b)의 형상은 블레이드 폭을 줄이기 위해 앞전과 뒷전 패널을 분리하는 형상이다. (c)의 형상은 블레이드를 길이 방향으로 분할하는 형상이다.

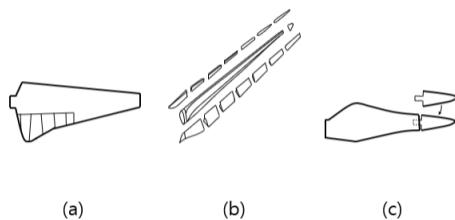


Fig. 1 Type of detachable blades

### 2.2 분리형 블레이드의 운송 동향 분석

본 연구에서는 운송 동향 분석에 대해 검토하였다. James[3]는 블레이드 길이 증가에 따라 운송 시 고려해야 할 요인과 풍력 터빈 블레이드 생산 공장에서 제작된 후 운송 수단을 비교 조사하였다. Smith[4]는 블레이드를 운반하는 경우 특정 중단점을 넘어가면 급격하게 운송 비용이 증가하기 때문에 운반 시 사용되는 최적의 경로와 운송 방법, 운송과정에서 발생하는 비용을 조사하였다. Flores[5]는 풍력 터빈 블레이드는 도로를 통해 운반해서 45m 이상의 길이는 오버사이즈 및 오버웨이트(OSOW) 화물로 운반하기 위한 운반 방법과 분리형 블레이드를 조사하였다. García, Grabau[6, 7]는 도로의 필요 사항을 요구할 수 있으며, 각 지역 규정은 도로 교통을 야간, 특정 날씨 조건으로 제한될 수 있으며, 블레이드 운반 시 특별 면허를 요구할 수 있다고 제시하였다. Grabau[7]는 블레이드가 길이의 증가가 무게 증가로 이어지기 때문에 수상에 부유하게 해서 해상 풍력 발전기에 운송 및 접착에 필요한 장치를 발명하였다. Smith, Ashraf[4, 8]는 블레이드를 크레인을 이용한 조립 및 운반하는 방법에 대해 중점으로 조사하였다. 도로나 철도 차량에 들어가기 힘든 크기의 블레이드는 수직 이착륙기(VTOL)를 이용해 공중에서 적재 및 하역이 가능한 수직 운반 방법에 대해 제안하였다. Griffin[9]은 46m 이상의 블레이드 길이에 대해서는 운송비용이 급격히 상승하고, 61m 이상의 블레이드에는 큰 부담이 될 수 있다고 제시하였다. Wobben[10]은 지하도와 터널, 교량 등 높이가 낮은 장애물을 통과하기 위해 수평 위치에서 거의 수직 위치로 회전할 수 있는 저상 트레일러에 대해 제시하였다. Kawada[11]는 블레이드 루트를 차량과 연결 후 블레이드의 팀이 위로 기울어질 수 있는 시스템을 사용하여 장애물을 통과할 것을 제안하였다. Nies[12]는 도로를 따라 길쭉한 물체를 운반하는 경우 반경이 상대적으로 좁은 모퉁이에서 어려움을 초래하기 때문에 블레이드를 기울이고 운반 차량의 길이를 줄일 것을 제안하였다. Landrum[13]은 더 큰 비율의 대형 풍력발전기가 기술의 발전으로 증가함에 따라 100피트 이상 현재는 150피트 정도에 이르기 때문에 두 대의 결합한 차량과 슬라이딩 지지대를 사용하는 것을 제안하였다. Thomsen[14]은 당김 장치를 이용해 블레이드의 곡률을 증가시켜 한쪽 끝을 위쪽으로 당기어 블레이드 길이를 줄여 도로로 운송할 수 있도록 제안하였

다. Schibbye[15]는 두 개의 철도 차량을 연결해 블레이드를 직선 상태로 유지해 블레이드의 굽힘이 가해지지 않도록 하고 팁 변위 제한기를 포함해 굽힘력에 대해 최소한의 굽힘을 적용하게 하여 운반에 용이하도록 제안하였다. Grabau[16]는 블레이드 길이가 짧을수록 작은 곡률을 적용해 강풍에서 작은 편향을 가지게 하였는데 길이가 길어짐으로써 작은 곡률은 강풍에 영향을 미치는 긴 블레이드에 바람직하지 않아 긴 블레이드일수록 큰 곡률을 제공해 운송 및 보관 문제를 해결하는 연구를 수행하였다. Berry[17]는 주 공장에서 준비된 재료 키트를 사용하여 소규모 현장 공장에서 블레이드를 생산하는 방식을 조사하였다.

Fig. 2에서 높이와 폭은 블레이드의 최대 시위선 길이와 블레이드 루트 직경, 굽힘 및 스위프에 따라 결정된다는 개념도를 제시하였다. 그리고 최대 허용 치수와 무게의 상관관계는 Table. 1에 제시되어 있다. Fig. 2에서 (1)은 최대 시위선 길이이다. (2)는 블레이드 뿌리 부위 직경이다. (3)은 블레이드 스위프이다. (4)는 블레이드의 굽힘이다.

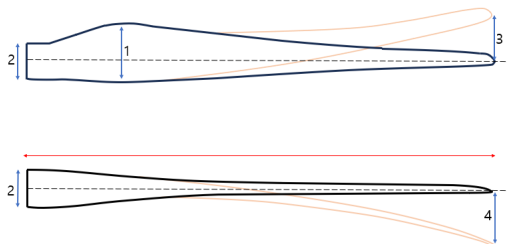


Fig. 2 The solid line shows a blade without pre-curving or sweep, while the dashed line show a swept and pre-curved blade

Table. 1 Maximum allowed dimensions and weights for the-transportation-of-wind-turbine-blades

Transportation Method	Max. Weight (Tonne)	Max. Length (m)	Max. Height (m)	Max. Width (m)
Rail	163	27.4	4	3.4
Road (overweight)	>36	45.7	4.1	2.6
Water(barge)	>200	76.2	13	16.5

### 2.3 분리형 블레이드의 연구 동향 분석

선행 연구에서 Castagnet[18]은 13m 길이의 블레이드가 장착된 터빈에서 후단 플랩 70cm의 엷지 플랩을 장착한 분리형 블레이드를 시연하여 능동 부하 감소 테스트를 진행하였다. Wetzel[19]은 기계적 조인트가 무겁고 비싸지만 빠르고 쉽게 조립할 수 있고, 접착 조인트는 구조적 및 경제적 효율성으로 선호되어 사용된다고 제안하였다. Zirin[20]은 분리형 블레이드는 세그먼트를 연결하기 위해 조인트 설계에 다양한 단점을 파악하고 그러한 단점들이 정렬을 위해 상당한 시간을 소모하게 하여 블레이드 세그먼트를 좀 더 단순화하고 정확하게 조립할 수 있는 조인트 설계를 해야한다고 제안하였다. Riddell[21]은 블레이드 세그먼트를 현장으로 운송하는 경우 더 저렴한 비용으로 운송되고 조립되어 스파 캡 세그먼트에 스파 캡 브라킷을 장착하는 섹션의 정렬을 유지하도록 설계된 접합 방법을 제안하였다. Martinez[22]는 T-볼트 접합부를 수치 및 실험을 통해 조사한 결과 T-볼트 접합부가 안정적이고 저렴하지만, T-볼트 접합부에 구조 효율이 낮아 인서트와 같은 다른 해결책에 비해 중량이 높다는 결론을 내렸다. Harismendy[23]는 블레이드 합판 외부와 각 크로스 볼트에 세로 볼트 두 개를 사용할 것을 제안했고, 반면 Quell[24]은 로터 블레이드 접합부를 더 작은 직경을 갖는 가로 방향으로 고정된 접합부를 이용해 너트를 통해 프리텐션되는 구현이 쉽고 안정적인 방법을 제안하였다. Doorenspleet[25]은 패키징 한계를 증가시키기 위해 로터 하중을 분산시킬 수 있는 다중 T-볼트를 사용할 것을 제안하였다. Jackson[26]은 50m 블레이드의 예비 설계를 수행하였다. 분리형 블레이드는 T-볼트 접합부와 스텐드 접합부를 고려하여 설계되었다. Dutton[27]은 블레이드에서 한 줄의 T-볼트를 사용하여 분할된 블레이드용 T-볼트 사용에 대해 분석하였다. Vionis[28]는 30m 분리형 블레이드에서 T-볼트를 이용하여 정적 테스트와 피로 테스트를 진행해 분석하였다. 23.5m 시제품 블레이드에 T-볼트의 이중 열을 사용하여 T-볼트 접합부 사용을 분석하였다. Lu[29]는 기존의 외팔보 형태의 길이 방향 설계를 개선했다. 경량화를 위해 분리형 블레이드를 재료 소모가 적고 가벼운 블레이드인 힌지 로드 지지구조(SBHR)로 제안하였다. 또한 블레이드에 충분한 견고성을 제공하려면 큰 시위선 길이를 가진 공기 역학적 형태가 필요하다

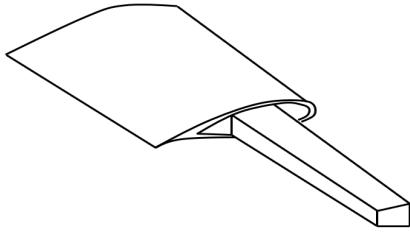


Fig. 3 Schematic illustration of a wind turbine system

고 제시하였다. Finnigan[30]은 블레이드를 조립하기 위해 블레이드를 외부 세그먼트와 내부 세그먼트로 나누어 블레이드 어셈블리를 두 개의 내부 벌크헤드를 이용해 조립을 쉽게 하는 것을 제안하였다. Fig 3에서 각각 다수의 세그먼트를 포함하는 블레이드 조립체의 개략도를 제시하였다.

Wang[31]은 분할형 풍력 로터 블레이드를 현장에서 조립 시 편의성과 증첩된 구조로 인한 공기 역학적 손실을 문제 삼아 개선하여 외부 셀로 인해 갭을 감싸 역학적 손실과 접촉 강도를 향상하였다. Eyb[32]는 커넥터 로드와 리셉터클이 서로 끼워지도록 구성된 수형 및 압형 박스 빔으로 형성하여 별도의 커넥터가 두 리셉터클에 삽입하여 영구적으로 연결하고 진공 주입을 통해 연결부위가 형성하는 방법을 제안하였다. Hibbard[33]는 블레이드를 하나 이상의 조인트를 포함하고 조인트당 2개 이상의 블레이드 섹션 및 하나 이상의 스파 브리지를 포함하여 하중과 모멘트를 스파 브리지를 통해 다른 블레이드 섹션의 구조적으로 강화된 부분으로 전달하여 구조적으로 안전할 수 있게 제시하였다. Pajard[34]는 기존의 분리형 블레이드는 패스너를 기계적 강도를 얻기 위해 어셈블리를 중복하게 되어 기계적 응력이 신뢰성에 해를 끼치기 때문에 V자형 단면을 가져 비교적 저렴하고 강도 및 토크를 전달 수 있게 제안하였다. Andrew[35]는 블레이드 세그먼트를 다른 세그먼트에 굽힘 모멘트를 전달하며 하중의 일부를 분산할 수 있도록 세그먼트들 사이에 핀 조인트를 하나 이상 설치하여 하중의 일부를 전달 수 있도록 구부러지게 구성되는 것과 그로 인해 핀 조인트에 압착 응력의 집중이 유발되는 것을 적어도 하나의 현방향 확장 핀을 갖는 로터 블레이드를 제안하였다. Anton[36]은 풍력 블레이드의 힘을 전달하는 보강 구조물 사이의 연결 조인트에서 해당 연결면의 확장으로 인해 유지력이 크게 증가하도록 하였다. 큰 연결 표면을 통해 풍력 터빈 블레이드 강도를 재설정하여 정상 사용뿐만

아니라 기상이변과 같은 극한 상황에도 하중을 견디기에 유리한 연결 표면의 치수를 보강하여 조인트 부분을 확장하는 방안을 제시하였다. Aaron[37]은 핀 조인트의 가장자리 하중이 불확실하고 구조적 효율성을 최대화하는 동시에 조인트 질량을 가능한 낮게 유지하는 것을 목표로 수형 전단 웹 부재의 높이가 국부적으로 증가된 수형 구조 부재는 제 1 및 제 2 로터 블레이드 세그먼트가 정렬되고 연결되도록 하고, 제 1 로터 블레이드 세그먼트의 압형 구조 부재 내에 수용하여 로터 블레이드의 블레이드 루트로부터 적어도 하나의 현방향 연장 핀을 향해 증가하는 높이를 갖도록 제안하였다.

## 2.4 분리형 블레이드의 분할 위치

분할의 위치는 최종 구조적 결과에 영향을 끼치며 블레이드의 하중은 루트를 향해 비선형으로 증가하며 이에 분할의 위치는 최종 구조적 거동 및 분할된 블레이드의 운송비를 고려하여 결정하여야 한다. 운송을 고려할 때 블레이드 루트로부터 스패 길이 방향 30~50% 분리가 유리하다. 스파 캡의 하중은 30~60% 지점에 집중되므로 분리하는 영역을 피하는 것이 구조적으로 안전하다. 블레이드는 뿌리 부위에서 끝으로 갈수록 에어포일 면적이 줄어들며 50%를 넘는 지역은 피하는 것이 접합에 유리하다. 접합을 위한 추가적 기계장치의 무게에 의한 동역학적 하중을 고려 시 40% 이하가 유리하다는 것으로 분석되었다. 모든 조건을 고려했을 경우 30~40%가 이상적인 분할 위치라고 분석하였다. Fig. 4에 플랩 방향 굽힘에서 스파 캡의 하중 예시를 그래프로 표현하여 제시하였다.

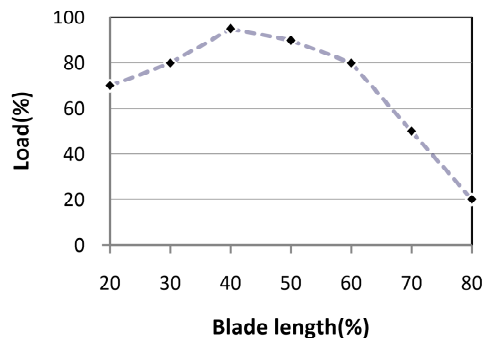


Fig. 4 Spar cap load in flap direction bending

## 2.5 국내외 개발 현황

본 연구팀은 국내외 선행 연구 결과를 분석하여 분리형 블레이드의 최적의 위치 선정에 대한 연구를 수행 중이다. 단면 로터 블레이드를 주요 결합에 대하여 피로수명 영향성 평가와 계획, 주요 손상 예측을 위한 기계학습 핵심 함수를 검토하고 비접촉식 변위 측정 시스템, 열화상 기반 기술 및 인공지능 연구 동향을 분석해 운용유지관리에 대한 연구를 수행하였다.

국외에서는 We4Ce에서 다양한 블레이드 길이를 제공하며 작은 블레이드 단면을 생산하고 운송하는 비용 절감을 발생시키는 단면 로터 블레이드를 제작하였다. Fig 5는 We4Ce에서 제작하는 분리형 블레이드의 형상이다.

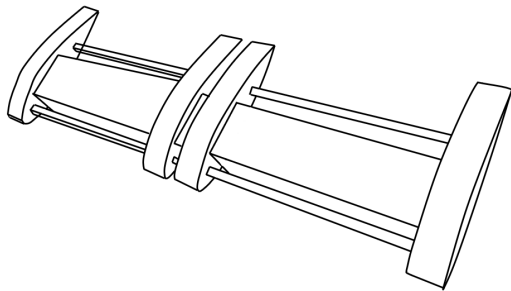


Fig. 5 Section rotor blades manufactured by We4Ce

## 3. 결론

현재 분리형 블레이드의 접착식 접합은 풍력 터빈 분야에서 일부 적용되고 있다. 분리형 블레이드의 구조 안전성 및 경제적 효율성 때문에 다양한 가능성과 잠재적인 이점을 가지고 있다. 향후 분리형 블레이드의 제작 공법은 풍력 터빈 분야의 기술을 향상시킬 전망이다. 분리형 블레이드는 제작 기술은 대형화되고 있는 풍력 터빈 블레이드의 운반을 용이하게 하여 육상 및 해상 풍력의 경제성 향상에 기여할 것으로 판단된다. 본 연구에서 분리형 블레이드에 대한 선행 연구 동향을 분석하여 향후 국내 독자적 분리형 블레이드 제작 공법을 개발할 계획이다.

## 후기

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030020380, 육상 풍력 운송 한계 돌파를 위한 70m이상 접착식 분리형 블레이드 개발). 본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임.(2023R1A6C101B042)

## 참고문헌

- [1] Krishnan, A., Al-Obaidi, A. S. M., & Hao, L. C. 2023. A comprehensive review of innovative wind turbine airfoil and blade designs: Toward enhanced efficiency and sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103511.
- [2] Liu, X., Lu, C., Liang, S., Godbole, A., & Chen, Y. 2017. Vibration-induced aerodynamic loads on large horizontal axis wind turbine blades. *Applied Energy*, 185, 1109-1119.
- [3] James, T., 2013, Goodrich, A. Supply Chain and Blade Manufacturing Considerations in the Global Wind Industry, NREL/PR-6A20-60063, National Renewable Energy Laboratory, Golden CO USA.
- [4] Smith, K, 2001, WindPact Turbine Design Scaling Studies Technical Area 2, Turbine, Rotor, and Blade Logistics, Technical Report, NREL/SR-500-29439, National Renewable Energy Laboratory, Kirkland, WA, USA
- [5] Flores, J, Chan, S and Homola, D, 2015, "A Field Test and Computer Simulation Study on the Wind Blade Trailer." In Proceedings of the Fifth International Symposium on Highway Geometric Design, Vancouver, BC, Canada pp. 22-24
- [6] García, E. I. R., and Innoblade, R. 2014, "Gamesa's Track Record on Blade Modularity." Proceedings of the IQPC Conference "Advances in Rotor Blades for Wind Turbines", Bremen, Germany pp. 25-27

- [7] Grabau, Peter, 2014 "Seaborne transportation of wind turbine blades." U.S. Patent No. 8,839,733.
- [8] Ashraf, Sadia, 2013, "Large Wind Turbine Blade Transportation Solution: The Aeroscraft." Wind Syst. pp. 24-32.
- [9] Griffin, Dayton A, 2001, Windpact turbine design scaling studies technical area 1-composite blades for 80-to 120-meter rotor. No. NREL/SR-500-29492. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States)
- [10] Wobben, A, 2003, A. Wind Turbine Blade Root Spacer for Increasing the Separation of the Blade Tip from the Tower. W.O. Patent 03,060,319 (A1)
- [11] Kawada, M., 2004, "Transporting Method and Transporter of Irregular Shaped Elongated Article." JP2004243805 501
- [12] Nies, J, 2012, "Transport device for an elongate object such as a rotor blade for a wind turbine or the like." U.S. Patent No. 8,226,342(B2)
- [13] Landrum, S.C. and King, T.C, 2009, "Wind turbine blade transportation system and method." U.S. Patent No. 7,591,621
- [14] Thomsen, Jens., 2015, "Transport system for a wind turbine blade." U.S. Patent No. 9,011,054
- [15] Schibbye, K and Sullivan, J.T, 2014, "Apparatus for railroad transportation of wind turbine blades." U.S. Patent No. 8,641,339.
- [16] Grabau, Peter, 2010, "Transporting and storing curved wind turbine blades." U.S. Patent No. 7,690,875
- [17] Berry, D, Lockard, S, Jackson, K, Zuteck, M and Ashwill, T, 2003, Blade Manufacturing Improvements Remote Blade Manufacturing Demonstration, Technical Report SAND2003-07 19, Sandia National Laboratories, Warren MI, USA
- [18] Castaignet, D, Barlas, T, Buhl, T, Poulsen, N.K, Wedel-Heinen, J.J, Olesen, N.A, Bak, C. and Kim, T, 2014, Full scale test of trailing edge flaps on a Vestas V27 wind turbine: active load reduction and system identification. Wind Energy, 17, 549 - 564
- [19] Wetzel., K, K, 2014, "Modular Blade Design & Manufacturing," Wind Turbine Blade Workshop. Albuquerque. NM USA
- [20] ZIRIN, Robert Michael, Lin, Wendy Wen-Ling, Zhou, Youdong, Quek, Shu Ching, Praveen, Grama, Kirkpatrick, Bowden, Livingston, Jamie Thomas and Baehmann, Peggy Lynne, 2010, "Multi-segment wind turbine blade and method for assembling the same." U.S. Patent No 7,740,453
- [21] RIDDELL, Scott Gabell. 2011, "Joint design for rotor blade segments of a wind turbine." U.S. Patent No 7,922,454
- [22] Martínez, V, Güemes, A, Trias, D and Blanco, N. 2011, Numerical and experimental analysis of stresses and failure in T-bolt joints. Composite structures, 93(10), pp. 2636-2645.
- [23] Harismendy, R.D.A, Amezueta, P, Sanz, M, Nuin, M, Lasa, M and Sanz, R. 2011 Sistema De Amarre Para La Union De Tramos De Palas De Aerogenerador Partidas. E.S. Patent 2,352,945 (A1),
- [24] Quell, P, Bendel, U, Schubert, M and Eusterbarkey, C, 2012, Rotor Blade Attachment US Patent 8,133,029.
- [25] Doorenspleet, F, Arelt, R and Eyb, E., 2009, Rotor Blade for a Wind Turbine. US Patent 7,517,194(B2).
- [26] Jackson, K.J, Zuteck, M.D, van Dam, C.P, Standish, K.J and Berry, D, 2005, "Innovative design approaches for large wind turbine blades." Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, pp. 141-171.
- [27] Dutton, A. G., Kildegaard, C., Kensche, C., and van Delft, DRV, 2000, Design, structural testing, and cost effectiveness of sectional wind turbine blades.
- [28] Vionis, P. Lekou, D. Gonzalez, F. Mieres, J. Kossivas, T. Soria, E. Gutierrez, E. Galiotis, C. Philippidis, T. Voutsinas, S. and Hofmann, D. 2006, Development of a MW scale wind turbine for high wind complex terrain sites: the

- MEGAWIND project. Proceedings of the EWEC, Athens, Greece.
- [29] Lu, H, Zeng, P, Lei, L, Yang, Y, Xu, Y and Qian, L, 2014, "A Smart Segmented Blade Turbine Rotor", Energy Convers, Manag, pp. 535-544.
- [30] Finnigan, P.M, Lanaud, C, Rengarajan, G and Qian, G, 2007, "System and method for joining turbine blades." U.S. Patent No. 8,123,488
- [31] Wang, W, Jin, B, Liu, Z, Dang, Q and Wang, S, 2012, "Segmented wind rotor blade for wind turbine generator system and assembling method thereof." U.S. Patent Application No. 13/504,474
- [32] Eyb, E, 2010, "Modular rotor blade for a wind turbine and method for assembling same." U.S. Patent No. 7,654,799
- [33] Hibbard, P and Hancock, M, 2016, "Sectional wind turbine blade." U.S. Patent No. 9,388,789
- [34] Pajard, J.P, 2012, "Aircraft wing including a plurality of dismountable members." U.S. Patent No. 8,128,032.
- [35] Andew, Thomas, 2018, "Jointed rotor blade having a chord-wise extending pin supported via one or more structural members" U.S. Patent No. 11,614,069 (B2)
- [36] Anton, 2004, "Wind turbine blades made of two separate sections, and method of assembly" U.S. Patent No 8,348,622 (B2)
- [37] Aaron, Christopher, Scott, Andrew, 2017, "Joint assembly for a wind turbine rotor blade" U.S. Patent No. 20,190,040,842(A1)